



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS BATAS KESTABILAN TEGANGAN PADA
SISTEM INTERKONEKSI JAWA BALI 500KV
DENGAN PEMASANGAN SVC PADA TAHUN 2024**

Yahri Redho Pranata
NRP 2215105066

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST. MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**ANALYSIS OF VOLTAGE STABILITY LIMIT IN JAVA
BALI 500KV INTERCONNECTION SYSTEM WITH
PRESENCING OF SVC IN 2024**

Yahri Redho Pranata
NRP 2215105066

Advisor
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST. MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Analisis Batas Kestabilan Tegangan Pada Sistem Interkoneksi Jawa Bali 500KV dengan Pemasangan SVC pada Tahun 2024”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, November 2017

Yahri Redho Pranata
Nrp. 2215 105 066

**ANALISIS BATAS KESTABILAN TEGANGAN PADA SISTEM
INTERKONEKSI JAWA BALI 500KV DENGAN PEMASANGAN
SVC PADA TAHUN 2024**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D
NIP. 194907151974121001

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 197411292000121001



ANALISIS BATAS KESTABILAN TEGANGAN PADA SISTEM INTERKONEKSI JAWA BALI 500KV DENGAN PEMASANGAN SVC PADA TAHUN 2024

Nama : Yahri Redho Pranata
NRP : 2215105066
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Rony Seto Wibowo, ST. MT.

ABSTRAK

Batas kestabilan tegangan adalah batas maksimum tegangan sebelum akhirnya tegangan jatuh secara cepat. Metode yang digunakan adalah transfer daya maksimum dengan menggunakan reduksi impedansi thevenin. Metode transfer daya maksimum ini menggunakan imedpansi thevenin sebagai batas kestabilan, batas tersebut diambil dari resistansi dan reaktansi thevenin di dalam jaringan. Karena faktor jaringan yang berbeda jauh antara reaktansi dan impedansi, maka batas \cos_{ϕ} dalam kondisi tidak baik. Oleh sebab itu dilakukan perubahan dengan \cos_{ϕ} menjadi lebih baik, namun masih dalam keadaan standar. Fungsi penempatan SVC adalah untuk meningkatkan batas kestabilan. Penempatan SVC perlu dioptimal kan untuk menekan harga pengadaan. Optimalisasi menggunakan pengalihan daya reaktif dan aktif secara satu persatu. Dari hasil simulasi Sistem transmisi Jawa Bali 2024 didapatkan bahwa rata-rata tengangan terendah terdapat pada bus bus 9,12,16,17, dan 18 yaitu : Duri-kosambi, Gandul, Cawang-baru, Cawang, dan Bekasi . Pemasangan kapasitor bank di bus 9,12,16,dan 17 dan pemasangan SVC pada bus 18 adalah pemasangan dengan total rugi-rugi daya terendah dibandingkan pemasangan SVC dibus terendah lainnya. Pemasangan SVC pada bus 18 dengan $B_c=1.6pu$ mampu memperbaiki tegangan terendah yaitu 0.948 menjadi 0.950. Pemasangan SVC pada bus 18 tersebut memiliki batas kestabilan tegangan yaitu 0.556pu.

Kata Kunci : Kestabilan tegangan, transfer daya maksimum, sensitifitas, Jawa Bali 500KV.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF VOLTAGE STABILITY LIMIT IN JAVA BALI 500KV INTERCONNECTION SYSTEM WITH PRESENCING OF SVC IN 2024

Name : Yahri Redho Pranata
NRP : 2215105066
Advisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Advisor II : Dr. Rony Seto Wibowo, ST. MT.

ABSTRACT

*The voltage stability limits are the maximum limit of voltage before the voltage drops rapidly. The method used is the maximum power transfer using thevenin impedance reduction. This maximum power transfer method uses thevenin impedance as a stability limit, the limit is taken from thevenin resistance and reactance within the network. Due to the much different networking factor between the reactance and the impedance, the \cos_{ϕ} boundary is not in good condition. Therefore, the change with \cos_{ϕ} to be better, but still in the standard state. The SVC placement function is to increase the stability limit. SVC placement needs to be optimized to reduce procurement prices. Optimization uses reactive and active power reactions individually. From the simulation result of Java Bali 2024 transmission system, it is found that the lowest average of *tengangan* is found in bus buses 9,12,16,17, and 18 are: Duri-kosambi, Gandul, Cawang-baru, Cawang and Bekasi. Installation of bank capacitors in buses 9, 12, 16, and 17 and installation of SVCs on bus 18 is the installation with the lowest total loss of power compared to the other lowest spliced SVC installations. Installation of SVC on bus 18 with $B_c = 1.6\text{pu}$ able to fix the lowest voltage that is 0.948 to 0.950. Installation of SVC on bus 18 has a voltage stability limit of 0.556pu.*

Keywords: Stability of voltage, maximum power transfer, sensitivity, Java Bali 500KV.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Batas Kestabilan Tegangan pada Sistem Interkoneksi Jawa Bali 500KV dengan Pemasangan SVC pada Tahun 2024”.

Penyusunan tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan program sarjana bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departement Teknik Elektro pada Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Ibunda dan ayahanda beserta keluarga tercita; adik dan kakak yang selalu memberikan motivasi, semangat, dan nasihat.
2. Dosen Pembimbing yaitu: Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D dan Bapak Dr. Rony Seto Wibowo, ST., yang telah memberikan pengetahuan, arahan, dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Teman-teman kelompok Jawa Bali: Anizar, Fajar, Apri, Dhito, Vita, Asgaf, Ozi, Ady, dan Tiar. Dan teman-teman sama dosen pembimbing: Imam, Wisnu, Oki, Chandra, Wahyu, Boni dan Norma.
4. Ketua program studi teknik sistem tenaga : Bapak Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
5. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
6. Teman-teman mahasiswa Jurusan Teknik Elektro ITS, terutama teman-teman lintas jalur angkatan 2015 Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan saran dan motivasi serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu .

Penulis berharap semoga karya tulis ini bermanfaat dan berguna umumnya buat pembaca dan khususnya buat penulis sendiri.

Surabaya, Desember 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	1
1.3	Batasan Masalah	2
1.4	Tujuan dan Manfaat	2
1.5	Metodologi	3
1.6	Sistematika Pembahasan	3

BAB 2 DASAR TEORI

2.1	Sistem Tenaga Listrik	5
2.2	Impedansi dan Admitansi Saluran	5
	2.2.1 Persamaan Saluran Transmisi Pendek	6
	2.2.2 Persamaan Saluran Transmisi Menengah	6
	2.2.3 Persamaan Saluran Transmisi Panjang	9
2.3	Aliran daya Sistem Tenaga Listrik	10
	2.3.1 Persamaan Aliran Daya Umum	11
	2.3.2 Persamaan Bus dalam n-Jaringan	12
2.4	Sistem Tenaga Metode Newton-Raphson	14
2.5	Kestabilan Tegangan	17
2.6	Indeks Kestabilan Tegangan (FVSI)	18
2.7	Transfer Daya Maksimum	21
2.8	Pengkompensasi VAR statis (<i>Static VAR Compensator</i>)	22
2.9	Tegangan Nominal Setelah Pemasangan SVC	25
2.10	Batas Kestabilan Tegangan Setelah Pemasangan SVC Dengan Sistem Penyederhanaan Dua Bus	26

BAB 3 DATA DAN METODOLOGI

3.1 Sistem Transmisi Jawa Bali 500kV pada Tahun 2024 29

3.2 Bagian Administrasi Pengatur Beban Transmisi Jawa Bali
2024..... 29

3.3 Diagram Satu Garis Sistem Transmisi Jawa Bali 2024..... 29

3.4 Klasifikasi Bus pada Sistem Transmisi Jawa Bali 2024..... 31

3.5 Data Pembebanan dan Saluran Transmisi Jawa Bali 2024..... 31

3.6 Penyederhanaan Dua Bus Thevenin 36

3.7 Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir..... 38

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Aliran Daya Newton-Raphson pada *Software* Matlab
Jawa Bali tahun 2024 41

4.2 Analisa Penempatan SVC dengan Metode *Multiple Single*
Load Bus pada Sistem Transmis Jawa Bali 2024..... 46

4.3 Penempatan SVC dan Kapasitor Bank..... 48

4.4 Penyederhanaan Dua Bus dengan Metode Thevenin 54

4.5 Batas Kestabilan Tegangan dengan Merode Transfer daya
maksimum tanpa Pemasangan SVC 55

4.5 Batas Kestabilan Tegangan dengan Metode Dua Bus
Transmisi dengan Pemasangan SVC..... 56

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan 59

5.2. Saran 59

DAFTAR PUSTAKA 61

LAMPIRAN (*SINGLE LINE DIAGRAM*)

LAMPIRAN (*DATA FVSI PERSALURAN*)

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

HALAMAN

Gambar 2.1	Rangkaian ekivalen jaringan transmisi pendek	6
Gambar 2.2	Rangkaian nominal PI jaringan transmisi menengah ..	7
Gambar 2.3	Rangkaian nominal Ti jaringan transmisi menengah ..	8
Gambar 2.4	Rangkaian nominal Ti jaringan transmisi panjang	9
Gambar 2.5	Model transmisi phi untuk sistme n-rel	12
Gambar 2.6	Kurva P-V dalam batas kestabilan tegangan	17
Gambar 2.7	Indeks kestabilan tegangan FVSI	19
Gambar 2.8	Teori kestabilan impedansi apperance diluar impedansi thevenin	21
Gambar 2.9	Konfigurasi bagian dalam SVC	23
Gambar 2.10	Kurva ekuivalen SVC untuk sudut penyalaan	23
Gambar 2.11	Kurva daya reaktif dan tegangan pada SVC	24
Gambar 2.12	Contoh diagram satu garis jaringan distribusi empat bus dengan pemasangan SVC	25
Gambar 2.13	Aliran daya dari stasiun pembangkitan ke pusat beban melalui jaringan transmisi dengan pemasangan SVC	26
Gambar 3.1	Rancangan sistem interkoneksi Jawa Bali 2024	30
Gambar 3.2	Flowchart penyederhanaan rangkaian metode thevenin	37
Gambar 3.3	Metodologi pengerjaan tugas akhir	38
Gambar 4.1	Profil tegangan bus Jawa Bali 2024	43
Gambar 4.2	Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 9	49
Gambar 4.3	Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 12	50
Gambar 4.4	Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 16	51
Gambar 4.5	Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 17	52
Gambar 4.6	Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 18	53

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 3.1	Data pembangkitan dan Pembebanan Jawa Bali 2024..... 31
Tabel 3.2	Data saluran sistem transmisi Jawa Bali 2024 33
Tabel 4.1	Hasil simulasi load flow Jawa Bali 2024 41
Tabel 4.2	Profil arus saluran dari hasil simulasi di bawah kapasitas saluran 44
Tabel 4.3	Hasil perkalian daya beban terhadap hasil tegangan magnitude pada bus beban 47
Tabel 4.4	Hasil perhitungan admitansi beban 54
Tabel 4.5	Penyederhanaan thevenin Jawa Bali 2024 55
Tabel 4.6	Hasil batas transfer daya maksimum..... 55
Tabel 4.7	Hasil batas daya maksimum $\cos \Phi$ beban=0.8 56
Tabel 4.8	Hasil batas daya maksimum $\cos \Phi$ beban=0.9 57

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan ketenaga-listrikan telah mengalami pengembangan sebagai akibat dari penambahan kebutuhan. Penambahan kebutuhan dilakukan dengan melakukan penambahan pembangkit. Penambahan pembangkit membuat telah terjadinya perubahan kualitas dan kestabilan di dalam sistem setiap busnya mengalami penurunan.

Masalah diatas seperti penurunan kualitas mengakibatkan peningkatan biaya operasi akibat bertambahnya rugi-rugi daya dalam saluran. Masalah lanjutan dari penurunan kualitas adalah masalah kestabilan sistem. Kestabilan sistem membuat sistem dalam keadaan stabil dengan batas tertentu. Bila batas terlewati maka sistem mengalami ketidak-stabilan dengan kondisi tegangan mengalami penurunan secara cepat untuk setiap peningkatan beban. Di dalam pembahasan tersebut, maka masalah batas kestabilan merupakan masalah prioritas setelah masalah kualitas.

Oleh karena itu perlu dilakukan kajian dalam menentukan batas kestabilan sistem. Pada tugas akhir kali ini, penulis menggunakan metode transfer daya maksimum. Transfer daya maksimum ini memerlukan analisa aliran daya untuk memperoleh tegangan setiap busnya. Adapun untuk menambah batas kestabilan tegangan maka sistem ditambahkan SVC (static VAR Compensator) termasuk sebagai FACTS (Flexible alternating Cunnrents Transmission System), yaitu meningkatkan kemampuan aliran daya dalam suatu jaringan yang dipasang FACTS tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Hal yang menjadi permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini:

1. Bagaimana sistem transmisi Jawa Bali tahun 2024 direncanakan?
2. Bagaimana batas kestabilan tegangan Sistem transmisi Jawa Bali 2024 sebelum pemasangan SVC?
3. Bagaimana menentukan penempatan SVC yang tepat ?
4. Bagaimana hasil batas kestabilan tegangan setelah pemasangan SVC?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah hanya membahas penempatan SVC yang tepat dan efisien untuk meningkatkan batas kestabilan tegangan, dimana kapasitor SVC tidak mengalami perubahan nilai suduut penyalan saat pemakaian sebagai bagian ilmu dari elektronika daya.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini :

1. Mendapatkan batas kestabilan tegangan.
2. Mendapatkan bus penempatan SVC.
3. Mendapatkan batas kestabilan tegangan setelah ditambahkan SVC.

Manfaat yang diharapkan dalam tugas akhir ini :

1. Memahami teori kestabilan tegangan dan transfer daya maksimum.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan data dan studi literatur

Studi literatur perlu dilakukan untuk menunjang penguasaan tentang pengumpulan pustaka untuk dipelajari dalam pengerjaan dan penelitian tugas akhir, dalam pencarian pustaka digunakan pengumpulan data dan pemodelan sistem. Data-data yang dikumpulkan adalah data sistem kelistrikan Jawa Bali. Data-data meliputi data pembangkitan, data beban, dan data saluran dari masing-masing bus.

2. Pemodelan dan simulasi

Pemodelan menggunakan software simulasi Matlab (*Matrixs Laboratory*). Matlab digunakan untuk menyelesaikan persamaan non-liner yang terlalu lama bila dihitung secara manual.

3. Analisis

Analisis yang berkaitan dengan batas kestabilan seperti: penyederhanaan rangkaian, load flow, bus sensitive, dan .batas kestabilan. Hasil analisa ini berbentuk kurva dan tabel.

4. Penulisan Buku Tugas Akhir

Penulisan buku tugas akhir diperlukan untuk menyalurkan hasil tugas akhir penulis, agar dikemudian hari dapat bermanfaat menjadi daftar pustaka untuk melakukan penelitian selanjutnya yang berkelanjutan.

1.6 Sistematika Pembahasan

Untuk memudahkan pembahasan yang akan dilakukan, tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis.

BAB II : Landasan Teori

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Landasan teori ini terdiri dari : Sistem tenaga listrik, Studi aliran daya, Persamaan aliran daya umum, Impedansi thevenin, Pengkompensasi VAR static (SVC), batas kestabilan tegangan setelah pemasangan SVC, dan Batas kestabilan tegangan dengan $\cos \phi$ beban konstan.

BAB III : Pemodelan Sistem

Pada Bab ini menjeleaskan pemodelan plant yang diambil penulis dengan beserta gambar data yang merupaka awal dari analisa. Berikut ini bagian-bagiannya, yaitu : Sistem kelistrikan jawa, Madura, dan bali beserta data yang didapat dari pusat pengatur beban, gandul, Jakarta yaitu data : pembebanan, aliran daya, jumlah bus saat kondisi peak, dan datasheet transmisi untuk perencanaan secara manual pada tahun 2024.

BAB IV : Hasil Simulasi dan Analisis

Pada bab ini berisi tentang hasil dari simulasi power flow beserta analisis mengenai pengaruh penambahan SVC pada bus yang paling sensitif dan bagaimana pengaruhnya terhadap kestabilan sistem jawa bali 500kV.

BAB V : Penutup

Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur dan analisis yang telah dilakukan. bagian ini penting untuk mempertegas bagian penting dalam hasil analisis.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Aliran Daya (*Load Flow*)

Aliran daya merupakan dasar studi untuk mengetahui besaran daya pembangkitan, arus penyaluran, dan besarnya voltage drop dalam saluran. Hal ini berfungsi untuk mendistribusikan, dan mengatur pembebanan tenaga listrik dalam jaringan yang terstruktur secara efektif dan efisien. Jaringan ini memiliki kompleksitas dimana memiliki persamaan yang tidak linear dari fungsi parameternya yaitu tegangan, arus, dan sudut penundaan dari komponen elektronika dan kabel jaringan listrik yang menghasilkan resistansi, induktansi, dan kapasitansi. Oleh sebab terdapatnya fungsi yang tidak- linier tersebut dan berbagai macam variabel pembentuk fungsi tersebut, maka digunakan pendekatan hasil yang menggunakan metode matematika. Persamaan matematika dalam jaringan sistem tenaga listrik dikenal lebih jauh dalam studi aliran daya yang akan dijelaskan lebih jauh dalam subbab : Aliran daya tenaga listrik dalam bab ini.

2.2 Impedansi dan Admitansi Saluran

Setiap saluran memiliki karakteristik yang menentukan nilai dari impedansi dan admitansi salurannya. Studi ini lebih lanjut akan membahas perbedaan admitansi dan impedansi pada faktor jarak jaringan. Dari jarak transmisi tersebut dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu :

1. Saluran Transmisi Pendek (*Short line*)

Saluran transmisi pendek dapat didefinisikan sebagai saluran transmisi yang panjangnya kurang dari 80 km (50 mile). Pada saluran model ini besar kapasitansi ke tanah sangat kecil, dengan demikian besar arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan.

2. Saluran Transmisi Menengah (*Medium line*)

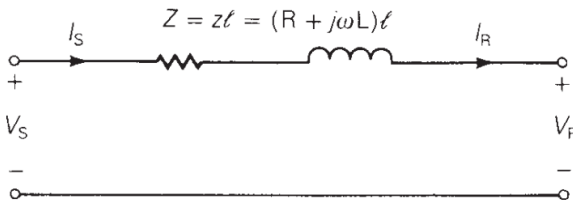
Saluran transmisi menengah adalah saluran transmisi yang memiliki panjang saluran antara 80 km (50 mile) sampai dengan 250 km (150 mile). Nilai kapasitansi pada saluran menengah relatif cukup besar, sehingga tidak dapat diabaikan dalam perhitungan. saluran transmisi menengah dibedakan menjadi dua model, yaitu: Saluran transmisi menengah nominal T Dan, Saluran transmisi menengah nominal PI (π).

3. Saluran Transmisi Panjang (*Long line*)

Saluran transmisi panjang adalah saluran transmisi yang memiliki panjang lebih dari 250 km (150 mile). Rangkaian T-Nominal dan Pi-Nominal tidak dapat merepresentasikan saluran transmisi panjang dengan tepat, karena rangkaian tersebut tidak memperhitungkan kenyataan bahwa besaran saluran tersebut tersebar merata. Perbedaan kedua rangkaian ekivalen tersebut dengan saluran transmisi yang sebenarnya menjadi sangat besar. Tetapi masih mungkin untuk mendapatkan rangkaian ekivalen dari saluran transmisi panjang dengan merepresentasikannya secara tepat dengan jaringan parameter terpusat, asal pengukuran-pengukuran hasilnya dilakukan pada ujung-ujung saluran.

2.2.1 Persamaan Saluran Transmisi Pendek

Persamaan dari jaringan transmisi pendek sangatlah sederhana, karena hanya memiliki impedansi. Rangkaianannya dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen jaringan transmisi pendek

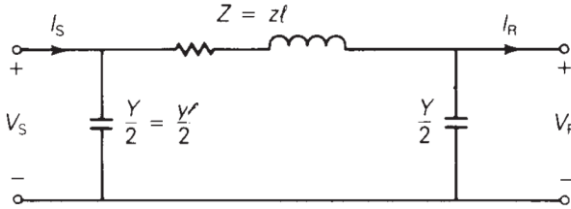
Rangkaian ekivalen jaringan transmisi pendek diatas dapat dibuat persamaannya menjadi persamaaan 2.6 dibawah ini.

$$V_S = V_R + I_R \cdot Z \quad (2.6)$$

2.2.2 Persamaan Saluran Transmisi Menengah

Persamaan jaringan transmisi menengah terbagi menjadi dua model, yaitu : model nominal PI (π) yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada dua titik dan impedansi serinya dipusatkan satu titik pada cabang serinya, dan model menengah nominal T yaitu saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada satu titik dan impedansi serinya terbagi dua pada kedua cabang serinya.

Untuk model nominal PI (π) keseluruhan administrasi shunt saluran dibagi dua sama besar dan ditempatkan masing-masing pada ujung penerima, sehingga dinamakan rangkaian berbentuk nominal PI. Untuk mendapatkan suatu rumus untuk V_R kita akan berpedoman pada gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Rangkaian nominal PI jaringan transmisi menengah

Arus pada kapasitansi pada ujung penerima adalah $V_R Y/2$ dan arus pada cabang seri adalah $I_R + V_R Y/2$, maka diperoleh persamaan:

$$V_S = \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)V_R + I_R \cdot Z \quad (2.7)$$

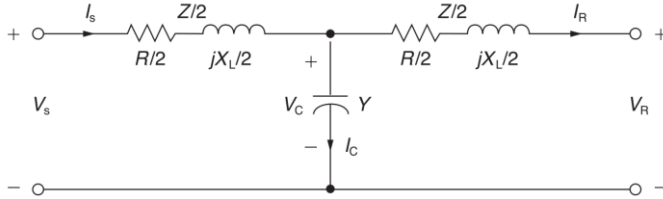
Arus pada kapasitansi shunt pada ujung pengirim adalah $V_S Y/2$ dan arus pada cabang seri adalah $I_R + V_R Y/2$. Sehingga jika ditambahkan arus pada ujung seri diperoleh arus I_S sebesar:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.8)$$

Dari persamaan 2.7 dan 2.8 diatas, maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$I_S = Y \left(1 + \frac{1}{4}YZ\right)V_R + \left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)I_R \quad (2.9)$$

Untuk model nominal T, gambar rangkaian dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Rangkaian nominal T jaringan transmisi menengah

$$V_S = Z \left(1 \times \frac{1}{2} YZ \right) V_R + \left(1 \times \frac{1}{4} YZ \right) I_R \quad (2.10)$$

$$I_S = YV_R \left(1 \times \frac{1}{2} YZ \right) I_R \quad (2.11)$$

Persamaan diatas dilakukan penyederhanaan sebagai konstanta ABCD. Konstanta ini lebih umum digunakan untuk membuat perhitungan persamaan lebih mudah dipahami daripada ditulis secara langsung. Konstanta A dan D adalah tanpa dimensi dan keduanya akan sama bila salurannya dilihat dari kedua ujung yang sama. Dimensi untuk B dan C masing-masing adalah ohm dan mho. Konstanta tersebut berlaku untuk jaringan empat terminal-linear, pasif, dan bilateral yang mempunyai dua pasang terminal. Maka didapatkan:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.12)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.13)$$

Sehingga kesimpulan persamaan dari kedua jenis model Pi dan Ti diatas dengan menggunakan konstanta ABCD, untuk rangkaian Pi adalah sebagai berikut :

$$A = D = 1 + \frac{1}{2} YZ$$

$$B = Z$$

$$C = Y \left(1 + \frac{1}{4} YZ \right)$$

Sedangkan konstanta ABCD, untuk rangkaian Ti adalah sebagai berikut :

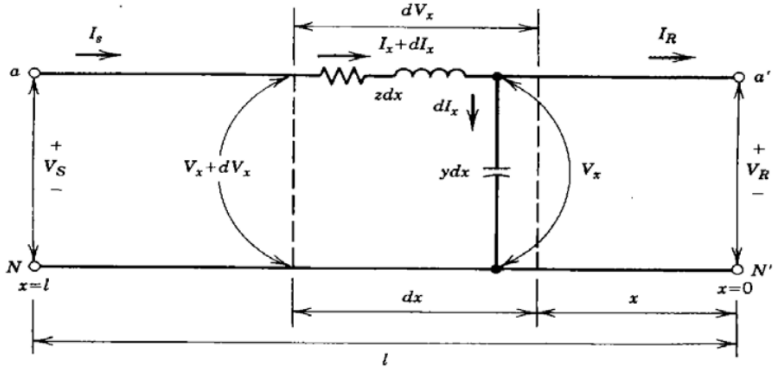
$$A = D = 1 + \frac{1}{2} YZ$$

$$B = Z \left(1 + \frac{1}{4} YZ \right)$$

$$C = Y$$

2.2.3 Persamaan Saluran Transmisi Panjang

Jaringan transmisi panjang memiliki variable lebih banyak daripada jaringan transmisi pendek, dan juga jaringan ini memiliki *line charging* lebih besar daripada jaringan transmisi menengah. Oleh sebab itu, maka persamaan diperlukan setelah memahami karakteristik.



Gambar 2.4 Rangkaian nominal Ti jaringan transmisi panjang

Karakteristik urutan positif ditentukan dengan konstanta ABCD yang didefinisikan dengan persamaan:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.14)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.15)$$

Dimana V_S dan V_R adalah tegangan ke netral, I_S dan I_R adalah arus saluran. Koefisien dari saluran transmisi ini merupakan hasil pemecahan secara hiperbolis kedalam konstanta karakter distribusi.

$$\begin{aligned} A &= \cos (ZY)^{-2} \\ &= \left[1 + \frac{YZ}{2!} + \frac{Y^2 Z^2}{4!} + \frac{Y^3 Z^3}{6!} + \dots \right] \\ &= 1 + \frac{1}{2} YZ \\ B &= \sqrt{Z/Y} \sin \sqrt{ZY} \\ &= \left[1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= Z \left[1 + \frac{1}{6} YZ \right] \\
C &= \sqrt{Z/Y} \sin \sqrt{ZY} \\
&= \left[1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right] \\
&= Y \left[1 + \frac{1}{6} YZ \right] \\
D &= A
\end{aligned}$$

Dimana:

- $Y = R + jX$ = impedansi total saluran = $(r + jX)l$
- $Z = G + jB$ = suseptansi total saluran = $(g + jb)l$
- g = konduktansi dalam mho per unit dari panjang saluran (umumnya diabaikan)
- b = suseptansi kapasitif dalam mho per unit dari panjang saluran
- l = panjang saluran

2.3 Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik

Studi aliran daya di dalam sistem tenaga merupakan studi awal dalam menentukan kestabilan tegangan. Manfaat dari studi aliran daya ini adalah mengetahui batasan tegangan, transien, dan pembebanan ekonomis. Studi aliran daya mengungkapkan kinerja dan aliran daya nyata dan reaktif untuk keadaan tertentu tatkala sistem bekerja saat tunak (*steady state*). Besarnya aliran daya di setiap saluran transmisi beserta rugi – ruginya dapat diketahui dengan menghitung lebih dahulu besarnya (magnitude) tegangan dan sudut fasornya pada semua bus. Pada setiap bus terdapat empat variabel yaitu :

1. Daya nyata (*net real power*) mempunyai symbol P dengan satuan Megawatt (MW).
2. Daya semu (*net reaktif power*) mempunyai symbol Q dengan satuan MegaVolt Ampere Reactive (MVAR).
3. Besaran Magnitude tegangan, mempunyai symbol V dengan satuan Kilovolt (KV).
4. Sudut fasa tegangan, mempunyai symbol δ dengan satuan radian.

Keempat variabel tersebut, untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya pada setiap busnya, maka perlu setidaknya dua buah variabel diketahui. Sehingga terdapat beberapa jenis Bus berdasarkan fungsinya dan Variabel diketahui, yaitu menjadi tiga jenis:

1. Bus beban.

Bus beban, (*Load bus*) adalah variabel yang diketahui adalah P_{load} dan Q_{load} , sedangkan variabel yang tidak diketahui adalah V dan δ .

2. Generator bus.

Generator bus adalah variabel yang diketahui adalah P_{gen} dan V_{bus} , sedangkan variabel yang tidak diketahui adalah δ dan Q .

3. Slack bus.

Slack bus adalah bus dengan variabel V dan δ selama perhitungan aliran daya akan tetap tidak berubah. (biasanya disetting $\delta = 0$), dengan Slack bus selalu mempunyai generator yang berfungsi mengkompensasi daya kurang didalam cakupan kemampuan dari generator tersebut. sehingga perhitungan aliran daya, P dan Q pada bus ini tidak diperhitungkan.

2.3.1 Persamaan Aliran Daya Umum

Aliran daya terbagi menjadi tiga jenis, yaitu daya nyata, reaktif dan semu. Daya nyata dan reaktif pada suatu bus i mempunyai persamaan sebagai berikut :

$$P_i - j Q_i = V_i * I_i \quad (2.16)$$

$$I_i = \frac{P_i - j Q_i}{V_i * } \quad (2.17)$$

I_i akan bertanda positif bila arus mengalir menuju ke bus i dan akan bertanda negatif bila arus mengalir keluar dari bus i . Dengan diperolehnya tegangan-tegangan pada tiap bus maka dapat dihitung besarnya aliran daya antara bus-bus yang terhubung. Besarnya arus yang mengalir dari bus i ke bus j adalah :

$$i_{ij} = (V_i - V_j)y_{ij} + V_i \frac{y_{ij}'}{2} \quad (2.18)$$

Dimana :

y_{ij}	Admitansi kawat $i - j$
y_{ij}'	Admitansi shunt kawat $i - j$
$V_i \frac{y_{ij}'}{2}$	Arus kontribusi pada bus i oleh arus shunt

Dengan diketahuinya arus yang mengalir dari bus i ke bus j maka dapat dihitung besarnya aliran daya yang mengalir dari bus i ke bus j .

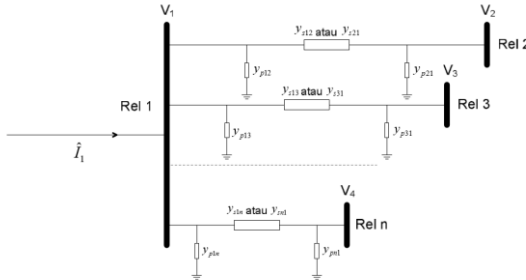
$$\begin{aligned}
 P_{ij} - j Q_{ij} &= V_i * I_{ij} \\
 P_{ij} - j Q_{ij} &= V_i * \left[(V_i - V_j)y_{ij} + V_i \frac{y_{ij}'}{2} \right] \\
 P_{ij} - j Q_{ij} &= V_i * (V_i - V_j)y_{ij} + V_i * V_i \frac{y_{ij}'}{2}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Sedangkan aliran daya yang mengalir dari bus j ke bus i adalah : Dengan menjumlahkan secara aljabar antara persamaan (2.4) dan persamaan (2.5), maka didapat rugi-rugi pada saluran kawat transmisi $i - j$.

$$P_{ji} - j Q_{ji} = V_j * (V_j - V_i)y_{ij} + V_j * V_j \frac{y_{ij}'}{2} \tag{2.20}$$

2.3.2 Persamaan Bus dalam n-Jaringan

Persamaan bus dalam n-jaringan sangat penting untuk menentukan admitansi keseluruhan sistem. Gambar 2.7 model transmisi phi untuk sistem n-rel dibawah ini sebagai penjelasan untuk mendapatkan persamaan umum dalam admitansi sistem adalah sebagai berikut :



Gambar 2.5 Model transmisi phi untuk sistem n-rel

Dari gambar diatas, maka berdasarkan persamaan aliran daya dan rangkaian listrik, maka didapatkan persamaan arusnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \hat{I}_1 &= \hat{V}_1 y_{p12} + \hat{V}_1 y_{p13} + \dots + \hat{V}_1 y_{p1n} + (\hat{V}_1 - \hat{V}_2)y_{s12} \\
 &\quad + (\hat{V}_1 - \hat{V}_3)y_{s13} + \dots + (\hat{V}_1 - \hat{V}_n)y_{s1n} \\
 &= (y_{p12} + y_{p13} + \dots + y_{p1n} + y_{s12} + y_{s13} + \dots + y_{s1n})\hat{V}_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -y_{s12}\widehat{V}_2 - y_{s13}\widehat{V}_3 + \dots - y_{s1n}\widehat{V}_n \\
= & Y_{11}\widehat{V}_1 + Y_{12}\widehat{V}_2 + Y_{13}\widehat{V}_3 + \dots + Y_{1n}\widehat{V}_n
\end{aligned}$$

Dari persamaan diatas maka dapat dijabarkan bahwa nilai admitansi di dalam dan luar bus satu adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= y_{p12} + y_{p13} + \dots + y_{p1n} + y_{s12} + y_{s13} + \dots + y_{s1n} \\
Y_{12} &= -y_{s12}; Y_{13} = -y_{s13}; Y_{1n} = -y_{s1n}
\end{aligned}$$

Sehingga bila dimasukkan kedalam persamaan aliran daya maka nilai admitansi setiap salurannya adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
\widehat{I}_1 &= \sum_{j=1}^n Y_{ij} \widehat{V}_j \\
P_1 - jQ_1 &= \widehat{V}_1^* \widehat{I}_1 = \widehat{V}_1^* \sum_{j=1}^n Y_{1j} \widehat{V}_j \\
P_i - jQ_i &= \widehat{V}_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \widehat{V}_j; i = 1, 2, \dots, n
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \widehat{I}_1 \\ \widehat{I}_2 \\ \vdots \\ \widehat{I}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \ddots & Y_{2n} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \\
Y_{bus} &= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \ddots & Y_{2n} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.21)
\end{aligned}$$

2.4 Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Newton-Raphson

Untuk menyelesaikan masalah aliran daya telah digunakan berbagai metode, cara yang paling sering digunakan sebagai salah satu materi dasar studi aliran daya adalah dengan membentuk matriks (Y) bus. Selanjutnya matriks tersebut dikerjakan dengan iterasi Gauss, Gauss-Seidel, Newton-Raphson, dan Fast Decoupled. Dalam literasinya metode Newton-Raphson memiliki kecepatan literasi dibanding metode lainnya.

Dasar dari metode Newton-Raphson dalam penyelesaian aliran daya adalah deret Taylor untuk suatu fungsi dengan dua variable lebih. metode Newton-Raphson menyelesaikan masalah aliran daya dengan menggunakan suatu set persamaan non-linier untuk menghitung

besarnya tegangan dan sudut fasa tegangan tiap bus. Daya injeksi pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i * \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j + BI_R \quad (2.22)$$

Dalam hal ini dilakukan pemisahan daya nyata dan daya reaktif pada bus i . Pemisahan ini akan menghasilkan suatu set persamaan simultan non-linear. Dalam koordinat kutub diketahui :

$$\begin{aligned} |V_i| \angle \delta_i &= |V_i| e^{j\delta_i} \\ |V_j| \angle \delta_j &= |V_j| e^{j\delta_j} \\ |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} &= |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}} \end{aligned}$$

Karena, $e^{j(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij})} = \cos(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) + j \sin(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij})$, maka pemisahan daya pada bus i menjadi komponen real dan imajiner adalah :

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= |V_i| \angle -\delta_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle \theta_{ij} + \delta_j \\ &= |V_i| e^{-j\delta_i} \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j (e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})}) \end{aligned}$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.23)$$

$$jQ_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.24)$$

Nilai P_i dan Q_i telah diketahui, tetapi diketahui, tetapi nilai V_i dan δ_i tidak diketahui kecuali pada slack bus. Kedua persamaan non-linear tersebut dapat diuraikan menjadi suatu set persamaan simultan linier dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya nyata ΔP_i dan daya reaktif ΔQ_i terhadap perubahan magnitude tegangan ΔV_i dan sudut fasa tegangan $\Delta \delta_i$.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Elemen-elemen matriks Jacobian dapat dihitung dengan menggunakan persamaan daya nyata dan reaktif pada bus i dari persamaan (2.23) dan (2.24) yang diturunkan sebagai berikut : ($i = 1, 2, \dots, n-1$). Elemen-elemen off-diagonal dari J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.26)$$

Elemen diagonal dari J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.27)$$

Elemen off-diagonal dari J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = -|V_i Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.28)$$

Elemen diagonal dari J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.29)$$

Elemen off-diagonal dari J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.30)$$

Elemen diagonal dari J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.31)$$

Elemen off-diagonal dari J_4 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = -|V_i Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}), j \neq i \quad (2.32)$$

Elemen diagonal dari J_4 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) - \sum_{j \neq i}^n |V_i Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) \quad (2.33)$$

Dari persamaan diatas, maka terbentuk matriks Jacobian adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Elemen-elemen matriks jacobian dihitung setiap akan melakukan iterasi. Perhitungan iterasi dimulai dengan memberikan perkiraan magnitudo tegangan dan sudut fasa tegangan mula-mula. Perubahan-perubahan dalam daya nyata dan daya reaktif yang telah diijadwalkan dikurangi dengan nyata dan daya reaktif yang dihitung dari persamaan (2.26) sampai (2.33)

$$\begin{aligned} \Delta P_i^k &= P_{i(terjadwal)} - P_i^k \\ \Delta Q_i^k &= Q_{i(terjadwal)} - Q_i^k, i = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Elemen-elemen jacobian dihitung dengan menggunakan magnitudo tegangan dan sudut fasa tegangan estimasi mula-mula. Dengan menggunakan metode invers langsung maka persamaan linier (2.11) dapat dipecahkan untuk mendapat nilai-nilai magnitudo tegangan dan sudut fasa tegangan estimasi yang baru pada tiap bus (kecuali slack bus), sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

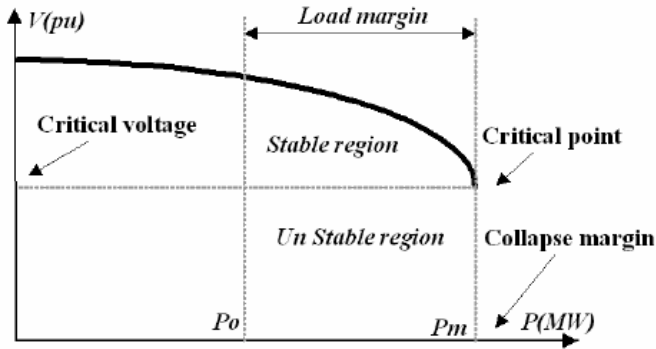
Proses iterasi kembali lagi ke proses awal dan hal ini terus diulangi samapai ΔP_i^k dan ΔQ_i^k untuk semua bus (selain slack bus) memnuhi harga toleransi yang diberikan yang biasa diambil ≤ 0.001 .

$$\begin{aligned}\Delta\delta_i^k &= \delta_i^k + \Delta\delta_i^k \\ |V_i|^k &= |V_i|^k + \Delta|V_i|^k\end{aligned}\quad (2.36)$$

Jadi iterasi selesai bila, $\Delta\delta_i^k \leq 0.001$ dan $\Delta\delta_i^k \leq 0.001$.

2.5 Studi Kestabilan Tegangan (*Voltage Stability*)

Kestabilan tegangan adalah bagian dari studi sistem tenaga yang merupakan hasil analisa dari studi aliran daya. Kestabilan tegangan ini juga merupakan bagian stabilitas di dalam sistem tenaga listrik, selain stabilitas transien. Kestabilan tegangan ini didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan kestabilan tegangan pada semua bus di sistem setelah mengalami gangguan dan mengembalikannya ke kondisi normal. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan bentuk penurunan atau kenaikan tegangan pada beberapa bus. Kestabilan ini erat kaitannya dengan Kurva P-V sebagai acuan dari penentuan stabilitas sistem. Kurva P-V tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Kurva P-V dalam Batas Kestabilan tegangan.

Kurva P-V dipengaruhi oleh faktor luar diatas kondisi normalnya. Kondisi ini biasa disebut sebagai gangguan stabilitas tegangan yang membuat sistem menjadi tidak stabil. Gangguan tersebut meliputi sebagai berikut :

1. Fluktuasi Tegangan, seperti: tegangan lebih (*overvoltage*), tegangan turun (*undervoltage*)

Tegangan lebih pada sistem akan mengakibatkan arus listrik yang mengalir menjadi besar dan mempercepat kemunduran isolasi (*deterioration of insulation*) sehingga menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya dan operasi, memperpendek umur kerja peralatan. Sedangkan, tegangan turun mengakibatkan yaitu sebagai berikut: meredupnya lampu, rendahnya torsi start awal, serta bergetar peralatan tegangan tinggi dibagaian induksasi. Tegangan turun biasanya disebabkan oleh kurangnya eksitasi pada generator listrik (*drop excitation*).

2. Tegangan Kedip (*Dip Voltage*)

Tegangan kedip adalah turunnya tegangan secara singkat akibat gangguan hubung singkat satu phasa dan tiga phasa. Stabilisator tegangan arus DC, *electromagnetic switch*, *variable speed motor*, *high voltage discharge lamp* dan *under voltage relay* adalah peralatan yang terkena dampak dari adanya tegangan kedip tersebut.

3. Tegangan Harmonik

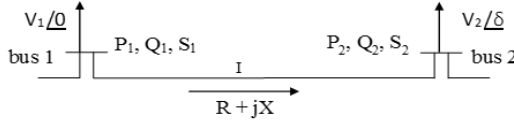
Tegangan harmonik dapat mengakibatkan panas yang berlebihan, getaran keras, suara berisik dan merusak peralatan tegangan tinggi yang diakibatkan oleh adanya frekuensi susulan, yang menyebabkan rugi-rugi saluran meningkat. Untuk mengatasinya maka diperlukan peralatan elektronika daya sebagai filter untuk mengurangi distorsi tegangan.

2.6 Indeks Kestabilan Tegangan (FVSI)

Indeksi kestabilan tegangan merupakan indikator menunjukkan kestabilan dan ketidakstabilan sistem. Salah satu indikator yang dibahas dalam tugas akhir kali ini, yaitu FVSI (*Fast Voltage Stability Index*). FVSI merupakan salah satu indeks kestabilan tegangan yang berdasarkan saluran dimana berawal dari persamaan arus untuk membuat persamaan kuadrat daya atau tegangan.

Kriteria yang diinginkan dari metode ini adalah diskriminan akar-akar dari persamaan kuadrat daya atau tegangan mempunyai nilai lebih besar dari nol. Ketika diskriminan bernilai lebih kecil dari nol, akan menyebabkan akar-akar persamaan kuadrat menjadi imajiner yang mana dapat membuat ketidakstabilan tegangan dan dapat menimbulkan *voltage collapse* pada sistem. Apabila indeks saluran yang didapat bernilai mendekati 1 maka mengindikasikan batas kritis kestabilan sistem.

FVSI didapat dengan model sistem tenaga dengan dua bus seperti pada gambar 2.7. Mengacu pada gambar 2.7, terdapat beberapa keterangan sebagai berikut:



Gambar 2.7 Indeks kesatabilan tegangan FVSI

Keterangan:

- V_1, V_2 = tegangan pada sisi pengirim dan sisi penerima
- P_1, Q_1 = daya aktif dan daya reaktif pada sisi pengirim (bus 1)
- P_2, Q_2 = daya aktif dan daya reaktif pada sisi penerima (bus 2)
- S_1, S_2 = daya semu pada sisi pengirim dan sisi penerima
- $\delta = \delta_1 - \delta_2$ = Perbedaan sudut antara sisi pengirim dan penerima
- δ_1

Pengasumsian bahwa sisi penerima (bus 1) sebagai referensi, misalkan besar $\delta_1=0$ dan $\delta_2=\delta$, maka persamaan arus (I) didefinisikan seperti pada persamaan (2.37):

$$I = \frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} \quad (2.37)$$

Dengan impedansi saluran bernilai $Z=R+jX$, sedangkan daya semu (*appereant power*) pada sisi peerima (bus 2) dapat ditulis sebagai berikut:

$$S_2 = V_2 I^* \quad (2.38)$$

Persamaan (2.38) dapat pula ditulis seperti persamaan (2.39) sebagai berikut:

$$I = \left(\frac{S_2}{V_2} \right)^* = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (2.39)$$

Dengan mensubsitusikan persamaan (2.37) dan persamaan (2.39), maka didapatkan persamaan (2.40) atau persamaan (2.41) yang direpresentasikan sebagai berikut:

$$\frac{V_1 \angle 0 - V_2 \angle \delta}{R + jX} = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \quad (2.40)$$

$$(V_1 V_2 \angle -\delta) - V_2^2 \angle 0 = (R + jX)(P_2 - jQ_2) \quad (2.41)$$

Persamaan (2.41) dipisahkan bagian real dan imajiner, sehingga didapat:

$$V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2 = R P_2 + X Q_2 \quad (2.42)$$

$$-V_1 V_2 \sin \delta = X P_2 - R Q_2 \quad (2.43)$$

Persamaan (2.43) secara matematis dapat mendefinisikan besarnya P_2 . Kemudian dapat disubsitusikan pada persamaan (2.42) menjadi persamaan kuadrat untuk tegangan V_2 seperti persamaan (2.44) sebagai berikut:

$$V_2^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 V_2 + \left(X + \frac{R^2}{X} \right) = 0 \quad (2.44)$$

Nilai akar dari persamaan (2.44), dengan rumus abc akan didapatkan persamaan akar-akar dari V_2 . Untuk mendapatkan nilai V_2 yang positif, maka terdapat syarat diskriminan dari persamaan (2.44) bernilai lebih besar atau sama dengan nol. Nilai diskriminan dapat dituliskan pada persamaan (2.45) dan penjabaran lebih lanjut menghasilkan persamaan (2.46) sebagai berikut:

$$\left[\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta \right) V_1 \right]^2 - 4 \left(X + \frac{R^2}{X} \right) Q_2 \geq 0 \quad (2.45)$$

$$\frac{4Z^2 Q_2 X}{(V_1)^2 (R \sin \delta + X \cos \delta)^2} \leq 1 \quad (2.46)$$

Besarnya δ sangat kecil atau dapat dikatakan $\delta \approx 0$, sehingga nilai $R \sin \delta \approx 0$ dan $X \cos \delta \approx X$. Dengan simbol i menggantikan bus pengirim, maka didapat FVSI seperti persamaan (2.47) sebagai berikut:

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_2}{V_1^2 X} \quad (2.47)$$

Keterangan:

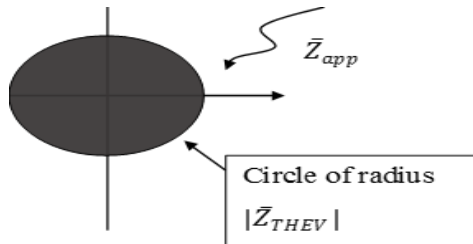
- Z = impedansi saluran (ohm)
- X = reaktansi saluran (ohm)
- Q_j = daya reaktif pada sisi penerima (Var)
- V_j = tegangan pada sisi pengirim (Volt)

Saluran yang mempunyai nilai indeks mendekati satu akan menjadi saluran yang paling kritis dan dapat memungkinkan menimbulkan skenario ketidakstabilan tegangan. FVSI juga dapat

digunakan untuk menentukan bus yang paling lemah berdasarkan pembebanan maksimumnya. Bus yang paling lemah ditandai dengan memiliki pembebanan maksimum yang terkecil.

2.7 Transfer Daya Maksimum

Teori transfer daya maksimum merupakan salah satu metode dalam menentukan batas kestabilan tegangan. Teori ini menyatakan bahwa untuk mempertahankan daya maksimum eksternal dari sumber dengan resistansi internal terbatas adalah resistansi dari beban harus dibuat sama dengan sumber. Gambar 2.8 dibawah ini menunjukkan teori kestabilan saat impedansi appereance berada diluar impedansi thevenin.



Gambar 2.8 Teori kestabilan impedansi appereance diluar impedansi thevenin

Teori transfer daya maksimum dapat diterapkan dalam jaringan AC dengan kondisi tercapai bila $Z_{load} = Z_{thevenin}$. Konsep transfer daya maksimum memberikan kondisi dimana tegangan mengalami penurunan drastis. Berikut ini untuk mecari P dan Q max bila $\cos\phi$ beban konstan.

$$\cos\phi = constant \quad (2.48)$$

$$Z_{load} = Z_{thevenin} \quad (2.49)$$

$$Z_{load} = R_L + jX_L(1 + \tan\phi) \quad (2.50)$$

$$R_l = |Z_{th}|\cos\phi \quad (2.51)$$

$$P_{load} = I^2|Z_{th}|\cos\phi \quad (2.52)$$

$$Q_{load} = P_{load}\tan\phi$$

Berdasarkan rumus kestabilan dari persamaan (2.49), maka ditentukan resistansi maksimum berdasarkan persamaan (2.50). Sehingga persamaan transfer daya maksimum adalah persamaan (2.50) dan (2.51) .

$$P_{load} = I^2 R_l$$

$$P_{load} = \frac{V_{th}^2 R_l}{(R_{th} + R_l)^2 + (X_{th} + R_l \tan \phi)^2}$$

2.8 Pengkompensasi VAR Statis (*Static VAR Compensator*)

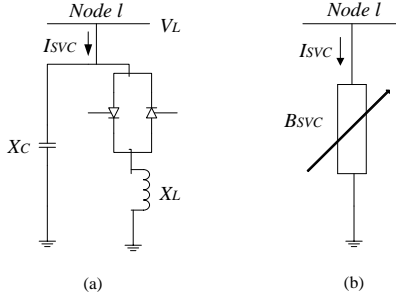
Pengkompensasi VAR Statis atau (*Static Var Compensator* ,SVC) adalah komponen FACTS yang merupakan komponen elektronika daya yang meningkatkan kemampuan aliran daya dalam jaringan transmisi AC. SVC dalam jaringan dipasang hubungan shunt atau paralel dikarenakan fungsi utamanya mengatur *line charging* terhadap *ground* di dalam saluran. Prinsip kerja SVC adalah sebagai reaktans variabel shunt, yang bisa menghasilkan atau menyerap daya reaktif untuk mengatur besarnya tegangan pada titik sambungan ke jaringan AC. Di dalam, SVC terdiri dari komponen *fixed capacitor* (FC) yang terhubung paralel dengan *thyristor-controlled reactor* (TCR). Secara umum ada dua konfigurasi SVC, yaitu:

a). Model firing angle SVC

Pemodelan SVC berupa reaktansi ekuivalen X_{SVC} , yang merupakan dari perubahan sudut penyalan α , yang terdiri dari kombinasi paralel admitansi ekuivalen thyristor-controlled reactor (TCR) dan reaktansi kapasitif tetap, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9(a) dibawah ini. Model ini memberikan informasi mengenai sudut penyalan SVC yang diperlukan untuk mencapai tingkat kompensasi tertentu.

b). Model *total susceptance* SVC

SVC dilihat sebagai sebuah reaktansi yang dapat diatur melalui perubahan susceptansi B_{SVC} , yang melambangkan nilai susceptansi SVC total yang diperlukan untuk mempertahankan besar tegangan bus pada nilai tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9(b) dibawah ini.



Gambar 2.9 Konfigurasi Bagian dalam SVC

B_{SVC} akan menyesuaikan secara otomatis untuk mengontrol besar tegangan sesuai yang diharapkan, B_{SVC} ditentukan besarnya berdasarkan sudut penyalan α pada thyristor. Besar ekuivalen susceptansi adalah sebagai berikut:

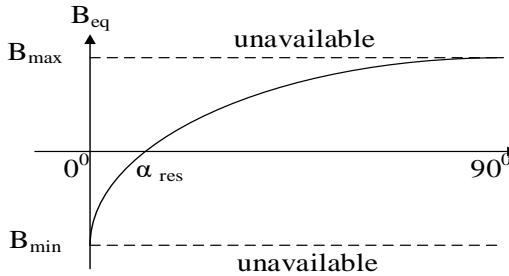
$$B_{SVC} = B_L(\alpha) + B_C \quad (2.53)$$

Dimana,

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left[1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right],$$

$$B_C = \omega C$$

Nilai minimum dan maksimum sudut penyalan thyristor pada SVC adalah 0° dan 90° . Pengaturan sudut penyalan berdasarkan pada kurva akuivalen 2.10 dibawah ini:



Gambar 2.10 Kurva ekuivalen SVC untuk sudut penyalan

Nilai SVC (B_{SVC}) berada pada range nilai minimum dan maksimum yang diatur oleh sudut penyalan, sebagai berikut:

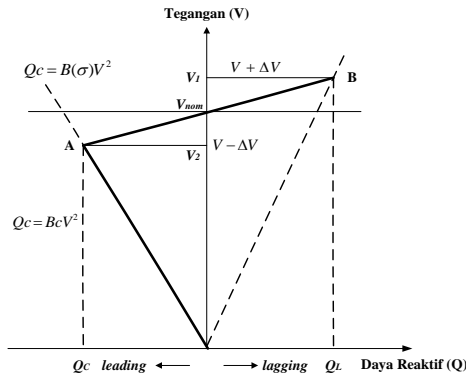
$$B_{SVCmin} \leq B_{SVC} \leq B_{SVCmax}$$

Daya reaktif yang dibangkitkan oleh SVC, yang juga merupakan daya reaktif yang diinjeksikan pada bus 1, berdasarkan nilai supsitansi SVC adalah sebagai berikut:

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_l \quad (2.54)$$

$$Q_{SVC} = Q_l = -V_l^2 B_{SVC} \quad (2.55)$$

Kurva daya reaktif yang dihasilkan SVC terhadap tegangan bus yang dipasang SVC ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut ini:



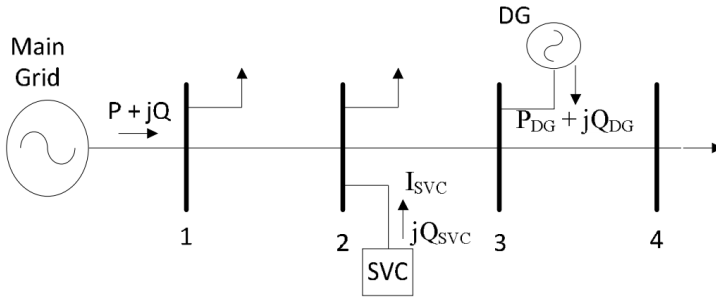
Gambar 2.11 Kurva daya reaktif dan tegangan pada SVC

Terdapat tiga area kerja SVC, yaitu:

- 1) Area kerja pertama terdapat di antara V_1 dan V_2 . Di area ini, SVC bersifat kapasitif atau induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah - ubah sesuai kebutuhan sistem seperti diberikan pada persamaan (2).
- 2) Area kerja kedua bila tegangan bus melebihi V_1 . Di area ini SVC memiliki karakteristik induktif.
- 3) Area kerja ketiga bila tegangan kurang dari V_2 . Di area ini SVC hanya berfungsi sebagai fixed capacitor saja.

2.9 Tegangan Nominal Setelah Pemasangan SVC

SVC yang telah dipasang pada jaringan distribusi akan menginjeksi atau mengabsorpsi daya reaktif ke atau dari sistem. Dengan demikian, pemasangan SVC memberikan pengaruh terhadap aliran daya jaringan distribusi tersebut, yaitu dengan penambahan ke sistem atau pengurangan dari sistem daya reaktif sebesar Q_k . Gambar 2.12 berikut merupakan contoh kasus pemasangan SVC pada jaringan distribusi sistem 4 bus.



Gambar 2.12 Contoh diagram satu garis jaringan distribusi empat bus dengan pemasangan SVC

Setelah SVC dipasang seperti yang terdapat pada gambar 2.12 di atas, persamaan dapat ditulis yaitu sebagai berikut:

$$I_2 = Y_{22}V_2 + \sum_{k=1}^3 Y_{2k}V_k + I_{SVC} \quad ; k \neq 2 \quad (2.56)$$

$$I_2 = Y_{22}V_2 + Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 + I_{SVC} \quad (2.57)$$

I_{SVC} akan bernilai positif bila SVC menginjeksi daya reaktif, sebaliknya akan bernilai negatif bila SVC mengabsorpsi daya reaktif. Dengan mensubstitusi $I_{SVC} = B_{SVC}V_2$ ke dalam Persamaan (2.56), maka I_2 dapat ditulis menjadi:

$$I_2 = Y_{22}V_2 + \sum_{k=1}^3 Y_{2k}V_k + B_{SVC}V_2 \quad ; k \neq 2 \quad (2.58)$$

Maka bentuk umum dari persamaan (2.58) tersebut di mana SVC dipasang pada bus ke-i dapat ditulis menjadi:

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{k=1}^n Y_{ik}V_k + B_{SVC}V_i \quad ; k \neq i \quad (2.59)$$

Besar arus pada persamaan diatas (2.59) disubstitusi ke dalam persamaan aliran daya pada bab sebelumnya, maka persamaannya menjadi sebagai berikut:

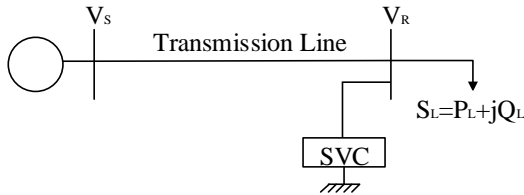
$$P_i - jQ_i = V_i^* \left(Y_{ii}V_i + \sum_{k=1}^n Y_{ik}V_k + B_{SVC}V_i \right) \quad ; k \neq i \quad (2.60)$$

Sehingga, nilai akhir tegangan magnitude setelah pengkompensasian SVC dalam jaringan adalah sebagai berikut:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k=1}^n Y_{ik}V_k \right] \quad ; k \neq i \quad (2.61)$$

2.10 Batas Kestabilan Tegangan Setelah Pemasangan SVC pada Penyederhanaan Dua Bus

Bagian ini menjelaskan teknik penentuan langsung batas stabilitas voltase atau titik kebisingan kurva P-V dari sistem 2 bus sederhana pada Gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13 Sistem mengalihkan daya dari stasiun pembangkit ke pusat beban melalui jalur transmisi dengan pemasangan SVC.

Daya reaktif SVC dapat disesuaikan dengan mengendalikan sudut penembakan thyristor. Saat beban meningkat, tegangan ujung penerima menurun. dan SVC menyuntikkan daya reaktif kapasitif untuk meningkatkan voltase. Namun, ketika pengoperasian SVC mencapai batas atas, tidak dapat menyesuaikan daya reaktif lagi untuk mempertahankan voltase yang diinginkan. Dengan demikian, tegangan beban menurun dengan kenaikan beban pada beban dan hasil akhirnya adalah keruntuhan voltase. Untuk operasi semacam itu, SVC dapat

diwakili oleh kerentanan kapasitif tetap B_C . Dalam kasus ini, arus (I_R) pada ujung penerima dapat ditulis sebagai:

$$I_R = (S_L/V_R)^* + jB_C V_R \quad (2.62)$$

Disini $S_L (= S \angle \theta = P_L + jQ_L)$ adalah beban kompleks dan V_R adalah kompleks yang menerima tegangan akhir. Voltase pengirim V_S dari sistem dapat ditulis sebagai:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.63)$$

Disini A dan B adalah konstanta jaringan transmisi. dalam bentuk rectangular, A dan B dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$A = a_1 + ja_2 \text{ dan } B = b_1 + jb_2 \quad (2.64)$$

Penggunaan persamaan(2.62) dan (2.64), dan persamaan Tegangan Kirim (2.63), Sehingga menciptakan persamaan sebagai berikut:

$$V_i = \left[\left(c_1 V_R + \frac{S(b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta)}{V_R} \right) + j \left[\left(c_2 V_R + \frac{S(b_2 \cos \theta - b_1 \sin \theta)}{V_R} \right) \right] \right] \quad (2.65)$$

Dimana,

$$c_1 = a_1 - b_2 B_C$$

$$c_2 = a_2 + b_1 B_C$$

Dalam persamaan(2.65), V_R ditentukan sebagai referensi. Setelah beberapa manipulasi matematika. Magnitude tegangan terima dapat dituliskan menjadi persamaan polinomial sebagai berikut:

$$c_3 V_R^4 + c_4 V_R^2 + c_5 = 0 \quad (2.66)$$

Dimana

$$c_3 = c_1^2 + c_2^2$$

$$c_4 = 2S(b_1 c_1 + b_2 c_2) \cos \theta + 2S(b_2 c_1 - b_1 c_2) \sin \theta - V_S^2$$

$$c_5 = S^2(b_1^2 + b_2^2)$$

Perhatikan bahwa persamaan(2.66) memiliki empat kemungkinan solusi namun hanya solusi yang layak (nyata dan positif) yang dapat digunakan untuk menghasilkan kurva P-V sistem. Pada titik kritis dari besaran tegangan beban, koefisien persamaan(2.66) harus memenuhi kriteria berikut:

$$c_4^2 - 4c_3c_5 = 0 \quad (2.67)$$

Persamaan nonlinear diatas dapat diekpresikan sebagai berikut:

$$f(S, \theta) = 0 \quad (2.68)$$

Untuk sudut faktor daya beban tertentu , persamaan. (2.68) dapat dinyatakan dengan polinomial orde kedua dari daya semu dan solusi polinom yang layak dapat dianggap sebagai daya beban semu kritis S_{CR} , pada titik kritis kurva P-V. Sehingga nilai S_{CR} bergantung pada faktor daya beban.

BAB 3

DATA DAN METODOLOGI

3.1 Sistem Interkoneksi Jawa Bali pada Tahun 2024

Pada tugas akhir ini data untuk simulasi yang diperlukan adaah data sistem tenaga listrik Jawa Bali 500 kV. Pemodelan Sistem transmisi Jawa Bali dalam bentuk *single line diagram* sistem tenaga listrik Jawa Bali 500 kV pada tahun 2024. Data parameter yang digunakan meliputi data saluran (*line*), data pembangkit (*generation*), dan data beban (*load*) pada aliran daya 500 kV pada tahun 2024 pada saat beban puncak (*peak load*) pukul 19.00 WIB. Dimana jumlah total beban yang terpasang adalah 28.667 MW dan 13.887 MVAR.

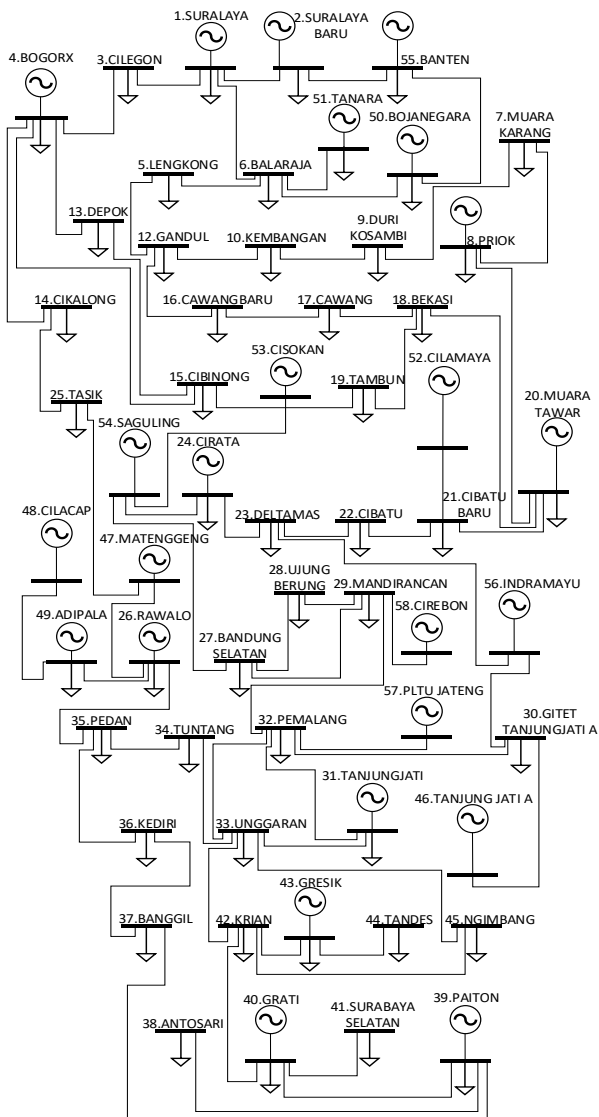
3.2 Bagian Administrasi Pengatur Beban Transmisi Jawa Bali 2024

Sistem interkoneksi listrik jawa, Madura, dan bali (Jawa Bali) 500 KV dioperasikan dan diatur oleh PT.PLN (Persero) P2B (Pusat Pengaturan Beban) di Gandul, Jakarta sesuai dengan perencanaan yang telah ditentukan. Pengaturan tersebut meliputi : pembangkitan dan perencanaan transmisi, pembangkit, dan gardu induk. Dalam hal operasai pembebanan prioritas P2b dibantu oleh bagian daerah atau Area pengatur beban (APB), dengan terdiri menjadi empat bagian , yaitu : DKI Jakarta dan Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur.

Sistem interkoneksi Jawa Bali ini memungkinkan adanya transfer antar area, sehingga kekurangan daya di suatu area akan dapat dibantu area lain melalui jaringan yang terinterkoneksi. Sistem interkoneksi ini juga membuat setiap kejadian di sistem tenaga listrik akan mempengaruhi ke seluruh sistem interkoneksi tersebut. Besarnya sistem interkoneksi ini diukur dari besarnya kapasitas pasokan dalam hal ini pembangkit, serta tingkat kebutuhan tenaga listrik.

3.3 Diagram Satu Garis Sistem Transmisi Jawa Bali 2024

Data perencanaan kelistrikan Jawa Bali tahun 2024 didapat dari P2B jakarta langsung dengan berdasarkan RUPTL 2016-2025 yang telah diterbitkan. Gambar 3.1 dibawah ini menunjukkan rancangan sistem interkoneksi jawa, madura, dan bali 2024 sebagai berikut :



Gambar 3.1 Rancangan Sistem Interkoneksi Jawa Bali 2024

3.4 Klasifikasi Bus pada Sistem Transmisi Jawa Bali 2024

Pada tugas akhir ini bus yang digunakan merupakan sistem tenaga listrik Jawa Bali 500 kV yang dapat dilihat pada single line diagram. Bus yang digunakan dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- 1. Slack bus (1 bus) yaitu PLTU Suralaya yang merupakan pembangkit listrik tenaga uap, pada slack bus magnitude tegangan dan sudut phase ditetapkan.
- 2. Generator bus (23 bus) yaitu : paiton, suralaya baru, bogor, priok, muara tawar, cirata, pesugihan, tanjung jati, grati, gresik, tanjung jati a, matenggeng, cilacap, adipala, bojonegara, tanara(Jawa-7), cilamaya, cisokan, saguling, banten, indramayu, jateng, dan cirebon.
- 3. Load bus (34 bus) yaitu: yaitu cilegon, lengkong, balaraja, muara karang, duri kosambi, kembangan, cikupa, gandul, depok, cigere, cibinong, cawing baru, cawing, bekasi, tambun, cibatu baru, cibatu, deltamás, tasik, bandung selatan, ujung berung, mandiracan, tanjung jati a, pemalang, unggaran, tuntang, pedan, Kediri, banggil, antosari, surabaya selatan baru, krian, tandes, dan ngambang.

3.5 Data Pembebanan dan Saluran Transmisi Jawa Bali 2024

Persamaan aliran daya dari data gambar 3.1 didapatkan, maka pemodelan sistem dapat dilakukan. Pemodelan dilakukan dengan program Matlab persamaan aliran daya dengan metode Newton-Raphson. Tabel 3.1 dibawah ini merupakan pemodelan Sistem transmisi Jawa Bali 2024 sebagai berikut:

Tabel 3.1 Data pembangkitan dan pembebanan Jawa Bali 2024.

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	1	Suralaya	36.3	17.59	1029.71	0
2	2	Suralaya baru	67.9	32.89	499.13	0
3	0	Cilegon	341.6	165.49	0	0
4	2	Bogor	274.1	132.79	2097.37	0
5	0	Lengkong	687.3	332.96	0	0
6	0	Balaraja	1149.4	556.82	0	0
7	0	Muara karang	538.8	261.02	0	0

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator	
			MW	MVAR	MW	MVAR
8	2	Priok	701.3	339.74	599.11	0
9	0	Duri kosambi	1330.6	644.6	0	0
10	0	Kembangan	865.7	419.38	0	0
11	0	Cikupa	651	315.37	0	0
12	0	Gandul	1287.8	623.87	0	0
13	0	Depok	537.3	260.29	0	0
14	0	Cikalong	754	365.27	0	0
15	0	Cibinong	922.8	447.05	0	0
16	0	Cawang baru	541.1	262.13	0	0
17	0	Cawang	846.9	410.28	0	0
18	0	Bekasi	937.1	453.97	0	0
19	0	Tambun	384	186.03	0	0
20	2	Muara tawar	549.1	266.01	2540.45	0
21	0	Cibatu baru	522.5	253.12	0	0
22	0	Cibatu	1251	606.04	0	0
23	0	Deltamas	553.7	268.24	0	0
24	2	Cirata	375.1	181.72	399.81	0
25	0	Tasik	525.4	254.53	0	0
26	2	Adipala	960.1	465.12	474.70	0
27	0	Bndng selatan	324.1	157.01	0	0
28	0	Ujung berung	472.3	228.8	0	0
29	0	Mandirancan	702.3	340.23	0	0
30	0	GI Tjg Jati A	1000	484.44	0	0
31	2	Tanjung jati	704.6	341.34	3336.29	0
32	0	Pemalang	417.8	202.4	0	0
33	0	Unggaran	88.2	42.73	0	0
34	0	Tuntang	413.9	200.51	0	0
35	0	Pedan	993.2	481.15	0	0
36	0	Kediri	752.7	364.64	0	0
37	0	Banggil	889.1	430.72	0	0
38	0	Antosari	718.9	348.27	0	0

No Bus	Bus Code	Nama Bus	Load		Generator	
			MW	MVAR	MW	MVAR
39	2	Paiton	710.5	344.2	2997.29	0
40	2	Grati	645.7	312.81	1748.14	0
41	0	Surabaya selatan	680.5	329.66	0	0
42	0	Krian	971.4	470.59	0	0
43	2	Gresik	38.4	18.6	699.28	0
44	0	Tandes	111.9	54.21	0	0
45	0	Ngambang	440.1	213.3	0	0
46	2	Tanjung Jati A	0	0	938.71	0
47	2	Matenggeng	0	0	599.58	0
48	2	Cilacap	0	0	1248.22	0
49	2	Adipala	0	0	599.52	0
50	2	Bojonegara	0	0	1398.52	0
51	2	Tanara	0	0	1876.05	0
52	2	Cilamaya	0	0	699.03	0
53	2	Cisokan	0	0	479.71	0
54	2	Saguling	0	0	119.94	0
55	2	Banten Energy	0	0	898.05	0
56	2	Indramayu	0	0	798.96	0
57	2	PLTU Jateng	0	0	1877.41	0
58	2	Cirebon	0	0	938.65	0

Sedangkan hasil pemodelan saluran perncanaan Jawa Bali 2024 dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah ini, yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.2 Data saluran Sistem transmisi Jawa Bali 2024.

No.	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	1	2	0.00001	0.00008	0
2	1	3	0.00006	0.00072	0
3	1	6	0.00026	0.00294	0
4	2	55	0.00002	0.00016	0
5	3	4	0.00127	0.01216	0.54432

No.	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
5	3	4	0.00127	0.01216	0.54432
6	4	13	0.00011	0.00132	0
7	4	14	0.00063	0.00610	1.09227
8	4	15	0.00035	0.00338	0
5	3	4	0.00127	0.01216	0.54432
6	4	13	0.00011	0.00132	0
9	5	6	0.00019	0.00183	0
10	5	12	0.00023	0.00220	0
11	6	11	0.00006	0.00092	0
12	6	50	0.00024	0.00359	0
13	6	51	0.00009	0.00139	0
14	7	8	0.00004	0.00046	0
15	7	9	0.00006	0.00069	0
16	8	20	0.00006	0.00069	0
17	9	10	0.00001	0.00014	0
18	10	11	0.00011	0.00122	0
19	10	12	0.00015	0.00169	0
20	12	13	0.00012	0.00120	0
21	12	16	0.00008	0.00120	0
22	13	15	0.00008	0.00079	0
23	14	25	0.00078	0.00878	1.58178
24	14	27	0.00047	0.00453	0.81043
25	15	19	0.00018	0.00170	0
26	15	53	0.00042	0.00468	0.84422
27	16	17	0.00003	0.00034	0
28	17	18	0.00015	0.00166	0
29	17	20	0.00048	0.00460	0
30	18	19	0.00004	0.00034	0
31	18	20	0.00021	0.00202	0
32	20	21	0.00028	0.00271	0
33	21	22	0.00003	0.00028	0

No.	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
34	21	52	0.00025	0.00278	0
35	22	23	0.00001	0.00011	0
36	23	24	0.00021	0.00238	0
37	23	56	0.00052	0.00777	1.43813
38	24	54	0.00014	0.00135	0
39	25	47	0.00020	0.00294	0
40	26	35	0.00153	0.01710	3.08230
41	26	47	0.00049	0.00468	0.83813
42	26	49	0.00006	0.00083	0
43	27	28	0.00039	0.00370	0
44	27	29	0.00172	0.01925	3.46898
45	27	54	0.00019	0.00211	0
46	28	29	0.00344	0.03849	1.73449
47	29	32	0.00048	0.00720	1.33128
48	29	58	0.00009	0.00105	0
49	30	32	0.00094	0.01052	1.89615
50	30	46	0.00001	0.00008	0
51	30	56	0.00178	0.02669	4.93657
52	31	32	0.00094	0.01052	1.89615
53	31	33	0.00068	0.00757	1.36451
54	32	33	0.00058	0.00646	1.16459
55	32	57	0.00008	0.00120	0
56	33	34	0.00011	0.00124	0
57	33	42	0.00298	0.02862	1.28117
58	33	45	0.00243	0.02339	1.04681
59	34	35	0.00028	0.00314	0
60	35	36	0.00070	0.00786	1.41667
61	36	37	0.00052	0.00581	1.04804
62	37	39	0.00056	0.00628	1.13210
63	38	39	0.00092	0.01387	2.56650
64	39	40	0.00044	0.00496	0.89445

No.	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
65	40	41	0.00053	0.00507	0.90720
66	40	42	0.00040	0.00449	0
67	42	43	0.00014	0.00135	0
68	42	45	0.00056	0.00538	0
69	43	44	0.00008	0.00086	0
70	48	49	0.00002	0.00029	0
71	50	55	0.00012	0.00113	0
72	53	54	0.00008	0.00084	0

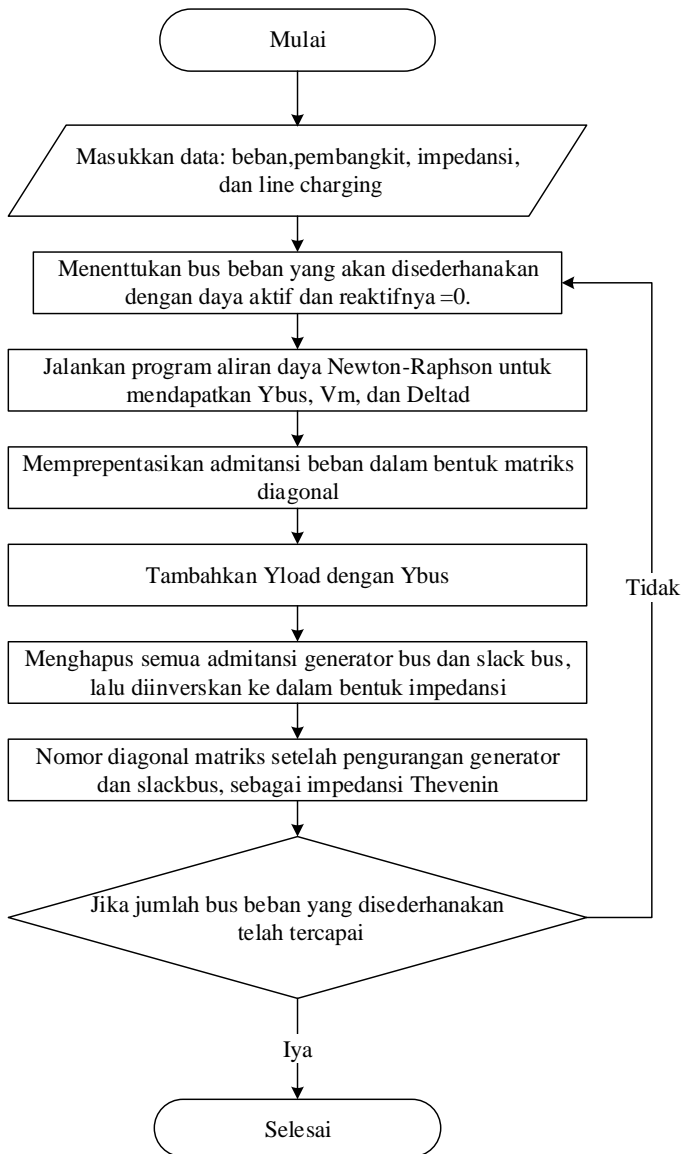
3.6 Penyederhanaan Dua Bus Thevenin

Penyederhanaan thevenin memerlukan admitansi beban dan tegangan thevenin bus setelah melakukan melakukan running load flow. Persamaan admitansi beban dan tegangan thevenin bus dapat dilihat dari persamaan dibawah ini :

$$Y_i^L = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|^2} \quad (3.1)$$

$$V_{K=0}^{th} = V_m \quad (3.2)$$

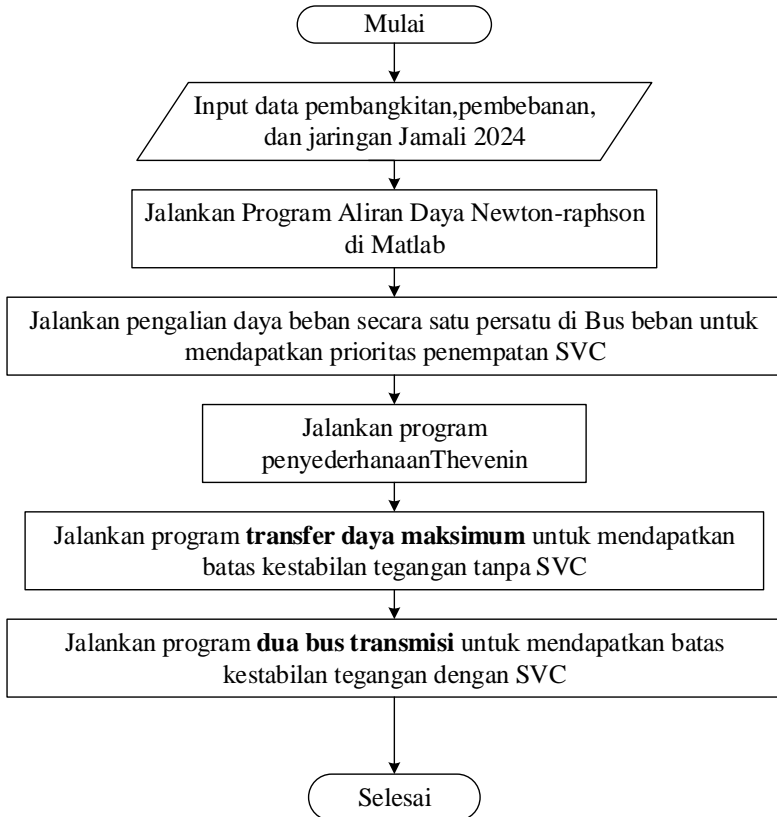
Langkah selanjutnya, adalah membuat algoritma pemrograman berdasarkan flowchart *voltage collapsed* gambar 3.2 di bawah ini..



Gambar 3.2 Flowchart penyederhanaan rangkaian metode Thevenin

3.7 Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

Diagram alur pengerjaan sangat diperlukan untuk membantu waktu dan proses selanjutnya yang akan dihadapi. Gambar 3.3 dibawah ini menunjukkan diagram alur yang dilakukan penulis saat pengerjaan tugas akhir, yaitu sebagai berikut :



Gambar 3.3 Metodologi pengerjaan tugas akhir.

Flow chat metodologi pengerjaan tugas akhir sesuai Gambar 3.3 diatas memiliki kesamaan pokok simulasi dan memiliki perbedaan dalam kasus, yaitu pertama tanpa pemasangan SVC dan kedua dengan pemasangan SVC. Berikut ini uraian pokok simulasi tersebut adalah :

1. Aliran Daya

Untuk mengetahui aliran daya pada sistem stabil atau tidak dilakukan analisa aliran daya dengan menggunakan *software* ETAP pada tugas akhir ini menggunakan ETAP versi 12.6.0. Analisa aliran disimulasikan dengan menggunakan data-data beban, data saluran, dan data pembangkitan dari data sistem transmisi Jawa Bali 500 kV.

2. Penyederhanaan Thevenin

Penyederhanaan Thevenin diperlukan untuk mengetahui batas maksimum pembebanan setiap bus dan dapat dibuktikan dengan aliran daya dari dua bus penyederhanaan thevenin tersebut.

3. Indeks Kestabilan Tegangan (FVSI)

Indeks ini diperlukan untuk mengoreksi apakah hasil transfer daya maksimum sesuai dengan indeks. Batas FVSI ini merupakan hasil akhir dalam menentukan batas karena hasilnya tidak memiliki error sedangkan batas penyederhanaan thevenin masih memiliki error.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Aliran Daya Newton-Raphson pada *Software* Matlab Jawa Bali di Tahun 2024

Simulasi untuk sistem tenaga listrik yang digunakan pada tugas akhir adalah dengan menggunakan MATLAB (*Matrixs Laboratory*). Metode Newton Raphson digunakan untuk perhitungan aliran daya sistem kelistrikan yang disimulasikan. Hasil running program load flow untuk tegangan dapat dilihat pada tabel 4.1.

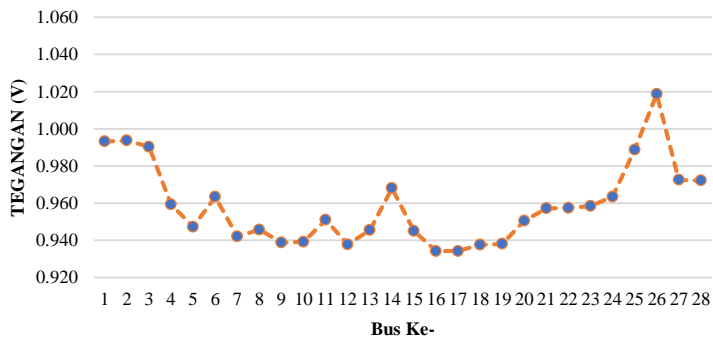
Tabel 4.1 Hasil simulasi load flow Jawa Bali 2024.

No Bus	Tegangan	Sudut	Generator	
			MW	MVAR
1	0.9932	-1.10	1029.71	850.70
2	0.9937	-1.04	499.13	134.04
3	0.9903	-1.38	0	0
4	0.9592	-3.87	2097.37	907.11
5	0.9473	-5.35	0	0
6	0.9634	-3.82	0	0
7	0.9420	-6.23	0	0
8	0.9457	-5.94	599.11	465.66
9	0.9387	-6.43	0	0
10	0.9392	-6.36	0	0
11	0.9510	-5.11	0	0
12	0.9378	-6.31	0	0
13	0.9455	-5.41	0	0
14	0.9680	-1.93	0	0
15	0.9449	-5.49	0	0
16	0.9342	-6.77	0	0
17	0.9342	-6.78	0	0
18	0.9375	-6.45	0	0
19	0.9381	-6.36	0	0
20	0.9505	-5.45	2540.45	1465.00

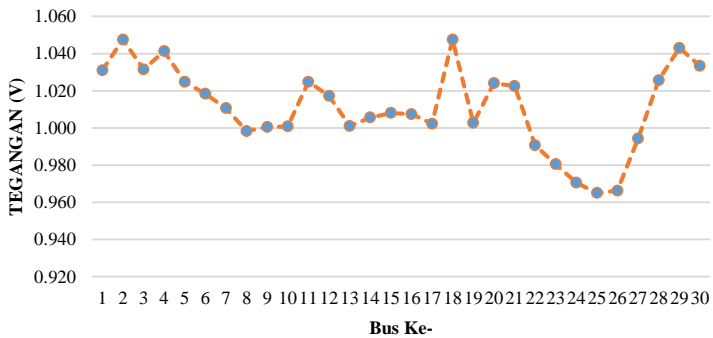
No Bus	Tegangan	Sudut	Generator	
			MW	MVAR
21	0.9572	-4.71	0	0
22	0.9574	-4.66	0	0
23	0.9584	-4.56	0	0
24	0.9634	-3.61	399.81	203.66
25	0.9887	5.00	0	0
26	1.0187	11.40	474.70	16.68
27	0.9725	-2.06	0	0
28	0.9721	-1.93	0	0
29	1.0310	9.61	0	0
30	1.0475	10.93	0	0
31	1.0315	20.58	3336.29	-99.89
32	1.0413	14.94	0	0
33	1.0248	13.86	0	0
34	1.0184	12.75	0	0
35	1.0106	10.61	0	0
36	0.9983	9.20	0	0
37	1.0005	10.62	0	0
38	1.0008	9.64	0	0
39	1.0248	15.17	2997.29	491.90
40	1.0173	14.56	1748.14	473.30
41	1.0010	12.69	0	0
42	1.0056	12.95	0	0
43	1.0080	13.36	699.28	197.60
44	1.0074	13.31	0	0
45	1.0023	12.06	0	0
46	1.0476	10.97	938.71	-19.36
47	1.0026	8.13	599.58	140.81
48	1.0240	12.43	1248.22	416.27
49	1.0226	12.23	599.52	-49.72
50	0.9907	-0.93	1398.52	375.63
51	0.9805	-2.30	1876.05	1108.84

No Bus	Tegangan	Sudut	Generator	
			MW	MVAR
52	0.9706	-3.58	699.03	411.10
53	0.9649	-3.25	479.71	162.48
54	0.9662	-3.10	119.94	45.32
55	0.9944	-0.96	898.05	631.24
56	1.0257	1.72	798.96	207.95
57	1.0431	16.12	1877.41	52.16
58	1.0333	10.14	938.65	151.20

Data tegangan setiap bus sistem jawa, madura, dan bali tabel 4.1 di atas dapat dilihat dengan bentuk grafik pada gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 (a) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024.



Gambar 4.1 (b) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024.

Dari data tegangan bus di atas, dapat disimpulkan ada beberapa bus memiliki tegangan di bawah standar. Selain profil tegangan daya aktif dan reaktif, faktor penting lainnya adalah melihat profil arus saluran. Arus saluran harus dipastikan dalam keadaan di bawah kapasitas saat dilakukan aliran daya. Tabel 4.2 dibawah ini menunjukkan data kapasitas saluran dan hasil simulasi arus saluran.

Tabel 4.2 profil arus saluran dari hasil simulasi di bawah kapasitas saluran.

Bus Kirim	Bus Terima	Kapasitas(A)	Hasil Simulasi (A)
1	2	2400	1314
1	3	2400	887
1	6	3240	2157
2	55	1980	1081
3	4	1980	448
4	13	3240	2594
4	14	1980	643
4	15	1980	1064
5	6	1980	1855
5	12	1980	931
6	11	3240	3072
6	50	3240	1791
6	51	3240	2504

Bus Kirim	Bus Terima	Kapasitas(A)	Hasil Simulasi (A)
7	8	3240	1491
7	9	3240	769
8	20	3240	1543
9	10	3240	1063
10	11	3240	2199
10	12	2400	54
12	13	1980	1646
12	16	3240	795
13	15	1980	226
14	25	2400	1572
14	27	1980	177
15	19	1980	1087
15	53	2400	1040
16	17	2400	66
17	18	2400	437
17	20	1980	661
18	19	1980	568
18	20	1980	1147
20	21	1980	573
21	22	2400	335
21	52	2400	948
22	23	2400	1989
23	24	2400	804
23	56	3240	1944
24	54	1980	777
25	47	3240	2184
26	35	2400	328
26	47	1980	1451
26	49	3240	2120
27	28	1980	68
27	29	2400	1344
27	54	2400	1017
28	29	2400	668
29	32	3240	1553
29	58	2400	1058

Bus Kirim	Bus Terima	Kapasitas(A)	Hasil Simulasi (A)
29	58	2400	1058
30	32	2400	785
30	46	2400	1035
30	56	3240	873
31	32	2400	1174
31	33	2400	1839
32	33	2400	391
32	57	3240	2078
33	34	2400	1919
33	42	1980	107
33	45	1980	167
34	35	2400	1417
35	36	2400	375
36	37	2400	505
37	39	2400	1565
38	39	3240	922
39	40	2400	272
40	41	1980	799
40	42	2400	784
42	43	1980	645
42	45	1980	341
43	44	2400	142
48	49	3240	1477
50	55	1980	422
53	54	2400	389

Tabel 4.2 diatas menunjukkan bahwa setelah dilakukan studi aliran daya, maka saluran telah mampu menghantarkan arus.

4.2 Analisa Penempatan SVC dengan Metode *Multiple Single Load Bus* pada Sistem Interkoneksi Jawa Bali 2024

Analisa penempatan SVC menggunakan pengalihan daya beban aktif dan reaktif secara satu persatu setiap busnya. Hal tersebut dilakukakn untuk mengetahui drop tegangan terbesar. Drop tegangan terbesar akan menjadi urutan prioritas dalam pemasangan SVC. Kenaikan beban mengikuti keadaan stabil sistem. Pada kasus ini kenaikan dilakukan tiga

kali, yaitu 1, 1.2, dan 1.4 kali terhadap beban yang merupakan keadaan beban normal. Berikut ini table 4.3 merupakan hasil multiple tegangan bus.

Tabel 4.3 Hasil perkalian daya beban terhadap hasil tegangan magnitude pada bus beban.

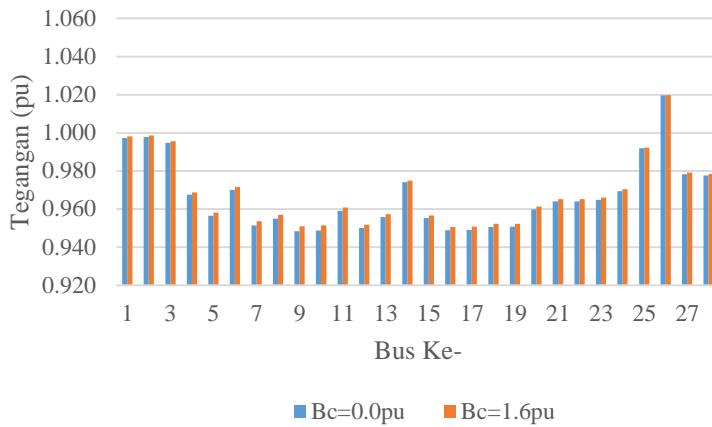
No Bus	<i>Multiple</i> beban terhadap tegangan			Rata-rata Tegangan	Rata-rata FVSI
	<i>Multiple</i> 1.0	<i>Multiple</i> 1.2	<i>Multiple</i> 1.4		
3	0.9903	0.9896	0.9888	0.9896	0.12381
5	0.9473	0.9452	0.9430	0.9451	0.05613
6	0.9634	0.9612	0.9589	0.9611	0.09741
7	0.9420	0.9407	0.9393	0.9407	0.01455
9	0.9387	0.9354	0.9319	0.9353	0.01472
10	0.9392	0.9370	0.9349	0.9370	0.04150
11	0.9510	0.9494	0.9478	0.9494	0.04526
12	0.9378	0.9347	0.9314	0.9346	0.03347
13	0.9455	0.9442	0.9430	0.9442	0.04733
14	0.9680	0.9647	0.9614	0.9647	0.07018
15	0.9449	0.9427	0.9404	0.9427	0.08356
16	0.9342	0.9326	0.9310	0.9326	0.01474
17	0.9342	0.9317	0.9292	0.9317	0.06055
18	0.9375	0.9349	0.9322	0.9349	0.04972
19	0.9381	0.9370	0.9358	0.9370	0.02328
21	0.9572	0.9557	0.9542	0.9557	0.04752
22	0.9574	0.9538	0.9500	0.9537	0.00349
23	0.9584	0.9568	0.9551	0.9568	0.23753
25	0.9887	0.9860	0.9832	0.9859	0.06259
27	0.9725	0.9714	0.9702	0.9714	0.30935
28	0.9721	0.9685	0.9649	0.9685	0.31621
29	1.0310	1.0288	1.0265	1.0288	0.31490
30	1.0475	1.0431	1.0384	1.0430	0.50198
32	1.0413	1.0406	1.0400	1.0406	0.08350
33	1.0248	1.0245	1.0242	1.0245	0.20947

No Bus	<i>Multiple</i> beban terhadap tegangan			Rata-rata Tegangan	Rata-rata FVSI
	<i>Multiple</i> 1.0 (pu)	<i>Multiple</i> 1.2 (pu)	<i>Multiple</i> 1.4 (pu)		
34	1.0184	1.0165	1.0146	1.0165	0.01871
35	1.0106	1.0044	0.9979	1.0043	0.25053
36	0.9983	0.9906	0.9825	0.9905	0.09323
37	1.0005	0.9931	0.9853	0.9930	0.09620
38	1.0008	0.9827	0.9630	0.9822	0.22322
41	1.0010	0.9941	0.9869	0.9940	0.07892
42	1.0056	1.0004	0.9949	1.0003	0.21483
44	1.0074	1.0067	1.0059	1.0067	0.00222
45	1.0023	0.9979	0.9935	0.9979	0.17436

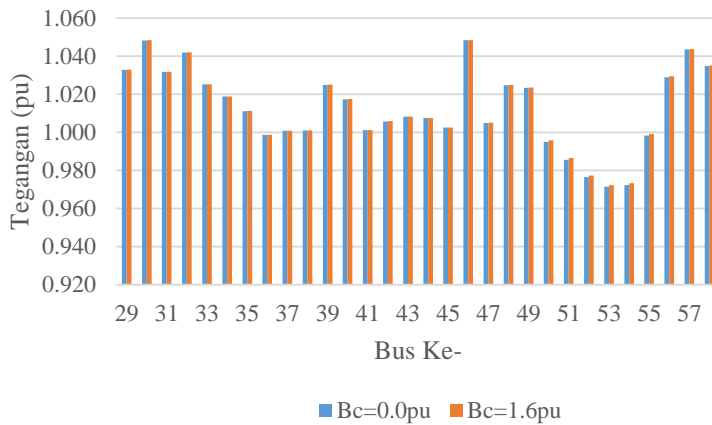
Peletakan SVC secara industri diletakan pada beban yang berubah secara cepat. Test dasar untuk mengetahui kecepatan perubahan tegangan atas dasar dari perubahan beban harus dilakukan dengan cara merubah beban sebesar 5%, 10,% dan selanjutnya sampai terjadi perbedaan tegangan. Setelah melakukan proses diatas pengalihan daya dengan rata-rata terendah terdapat pada bus bus 17, 16, 12, 18, dan 9. Metode ini dibandingkan dengan metode FVSI sebagai komperasi.

4.3 Penempatan SVC dan Kapasitor Bank

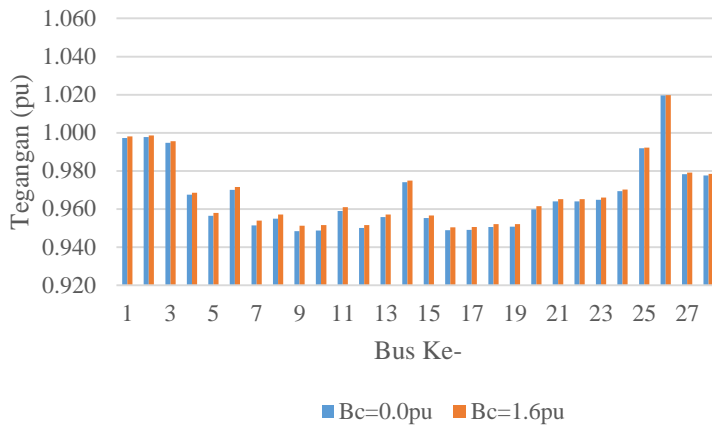
Penempatan SVC dan kapasitor bank diperlukan untuk memperbaiki kualitas tegangan sehingga dalam batas standar IEEE. Prosedur perbaikan kualitas tegangan dalam tugas akhir ini menggunakan empat buah kapasitor bank dan satu buah SVC. Analisa Penempatan SVC dilakukan secara bergantian di lima bus penempatan dan empat bus tegangan terendah selanjutnya menggunakan kapasitor bank. Kapasitor bank yang digunakan adalah 200MVAR. Gambar dibawah menunjukkan beberapa kasus dimana SVC belum bekerja(yaitu $B_c=0$) dan bekerja operasi minimum ($B_c=1.6pu$). Gambar 4.2 adalah penempatan SVC di bus 9. Gambar 4.3 adalah penempatan SVC di bus 12. Gambar 4.4 adalah penempatan SVC di bus 16. Gambar 4.5 adalah penempatan SVC di bus 17. Gambar 4.6 adalah penempatan SVC di bus 18.



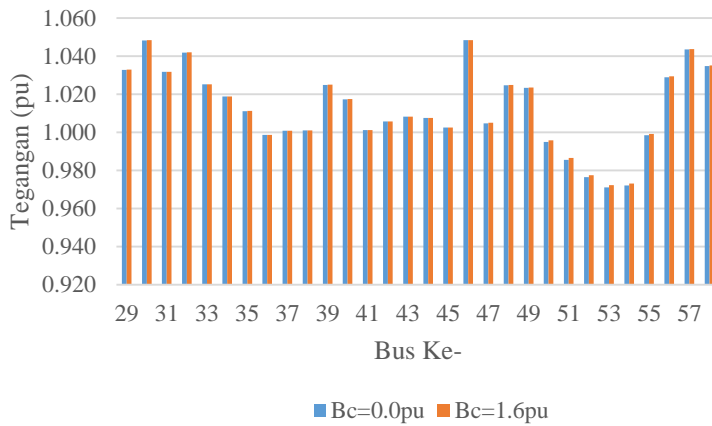
Gambar 4.2 (a) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 9.



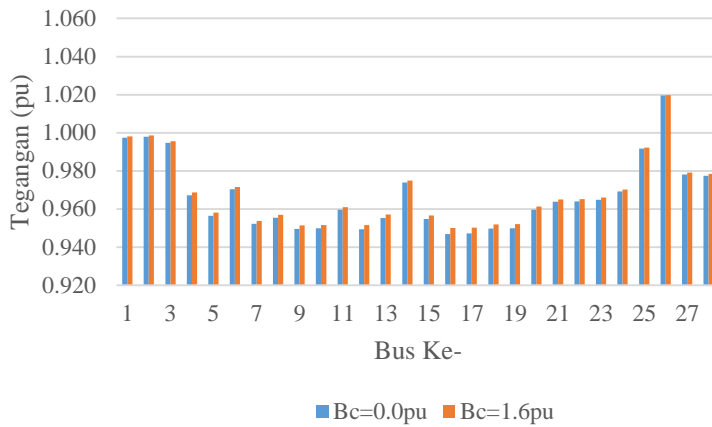
Gambar 4.2 (b) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 9.



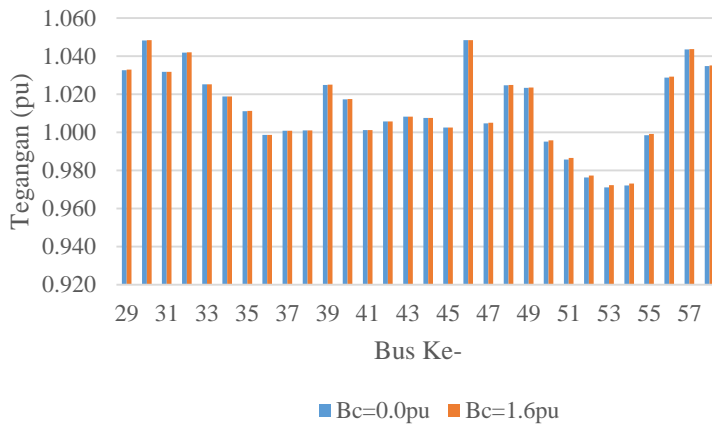
Gambar 4.3 (a) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 12.



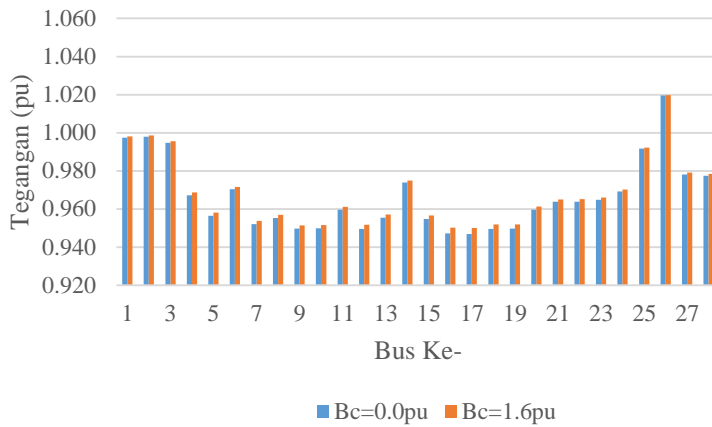
Gambar 4.3 (b) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 12.



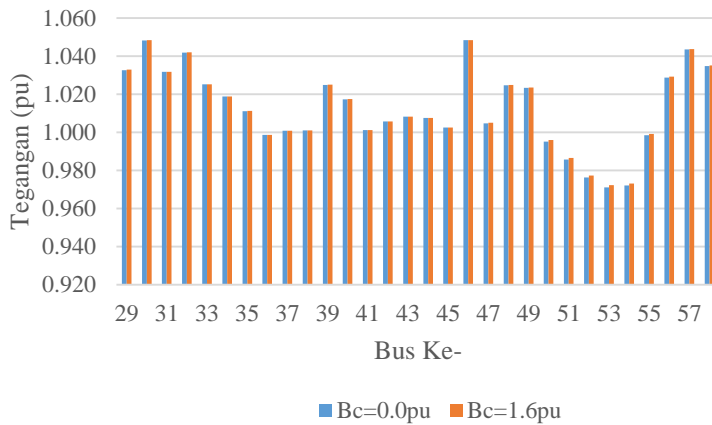
Gambar 4.4 (a) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 16.



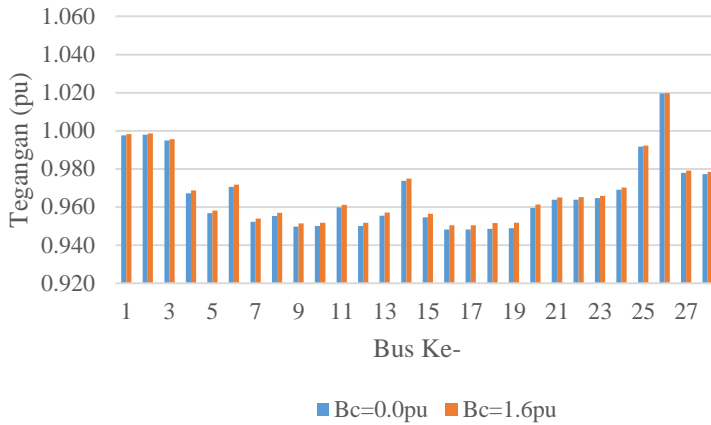
Gambar 4.4 (b) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 16.



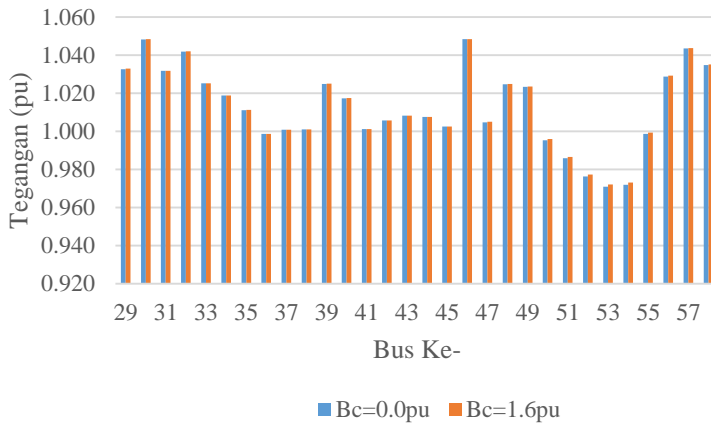
Gambar 4.5 (a) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 17.



Gambar 4.5 (b) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 17.



Gambar 4.6 (a) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 18.



Gambar 4.6 (b) Profil tegangan bus Jawa Bali 2024 SVC di bus 18.

Gambar diatas menunjukkan bahwa sebelum SVC bekerja dan kapasitor bank telah aktif, maka tegangan belum mampu mencapai standar. Setelah SVC aktif dalam operasi minimum, maka tegangan mampu mencapai standar. Bila melakukan analisis penempatan SVC pada

kelima kasus diatas, maka penempatan SVC pada bus 18 merupakan penempatan terbaik dalam jumlah rugi daya aktif saluran dengan jumlah rugi daya aktif terkecil sebesar 256.274MW.

4.4 Pedyerhanaan Dua Bus dengan Metode Thevenin

Berdasarkan bus yang mengalami drop tegangan yang paling besar atau sensitive memiliki rangkaian terhubung dengan Slack, maka dipakailah metode reduksi thevenin. Perhitungan impedansi beban diperlukan untuk menentukan tegangan thevenin. Tabel 4.4 dibawah ini menunjukkan hasil impedansi bus yang memiliki load adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Admitansi beban.

No Bus	Y Load real (pu)	Y Load imag (pu)	No Bus	Y Load real (pu)	Y Load imag (pu)
1	0.364	-0.177	24	4.031	-1.212
2	0.681	-0.331	25	5.256	-2.354
3	3.461	-1.617	26	8.818	-5.311
4	2.985	-0.832	27	3.426	-1.069
5	7.820	-1.913	28	4.975	-1.464
6	12.591	-3.938	29	6.604	-3.436
7	6.063	-1.223	30	9.530	-5.441
8	7.760	-1.627	31	5.576	-5.163
9	15.263	-3.019	32	3.774	-2.472
10	9.923	-2.004	33	0.864	-0.438
11	7.322	-1.883	34	4.189	-1.902
12	14.869	-2.917	35	10.536	-3.713
13	6.089	-1.332	36	8.456	-1.526
14	8.069	-2.011	37	9.873	-1.462
15	10.440	-2.229	38	7.907	-0.604
16	6.265	-1.135	39	7.358	-1.662
17	9.785	-1.757	40	6.628	-1.750
18	10.697	-1.994	41	7.317	-1.435
19	4.385	-0.827	42	10.284	-2.713
20	5.957	-1.319	43	0.402	-0.112

No Bus	Y Load real (pu)	Y Load imag (pu)	No Bus	Y Load real (pu)	Y Load imag (pu)
21	5.658	-1.235	44	1.173	-0.325
22	13.579	-2.932	45	4.732	-1.262
23	6.002	-1.674			

Langkah selanjutnya adalah melakukan penyederhanaan untuk mendapatkan impedansi dan tegangan thevenin yang ditunjukkan pada berdasarkan gambar flowchart penyederhanaan 3.2 dengan hasilnya pada tabel 4.5 dibawah ini:

Tabel 4.5 Penyederhanaan thevenin lima bus tanpa pemasangan SVC.

No Bus	Voltage Thevenin(pu)	Resistansi Thevenin(pu)	Reaktansi Thevenin(pu)
9	0.9628	0.00018	0.00152
12	0.9625	0.00018	0.00145
16	0.9543	0.00027	0.00185
17	0.9582	0.00025	0.00184
18	0.9603	0.00023	0.00174

4.5 Batas Kestabilan Tegangan dengan Metode Transfer Daya Maksimum tanpa Pemasangan SVC

Batas maksimum kestabilan tegangan dengan metode transfer daya maksimum digunakan dalam tugas akhir kali ini. Metode ini diambil karena memiliki kecepatan dalam menghitung pada bus yang sangat banyak seperti halnya dengan sistem Jawa bali di tahun 2024 ini. Berikut tabel 4.6 dibawah ini merupakan hasil batas dari metode transfer daya maksimum ini.

Tabel 4.6 Hasil batas transfer daya maksimum

Bus	Pmax (Cos $\Phi=0.8$) (MW)	Vmax (Cos $\Phi=0.8$) (pu)	Pmax (Cos $\Phi=0.9$) (MW)	Vmax (Cos $\Phi=0.9$) (pu)
9	14.348	0.524	17.732	0.549
12	14.964	0.523	18.477	0.548
16	11.413	0.516	14.062	0.540
17	11.625	0.520	14.341	0.544
18	12.334	0.521	15.218	0.545

4.6 Batas Kestabilan Tegangan dengan Metode Dua Bus Transmisi dengan Pemasangan SVC

Batas kestabilan tegangan dengan metode dua bus transmisi dengan pemasangan SVC dipakai karena berkaitan dengan metode sebelumnya yaitu penggunaan parameter penyederhanaan rangkaian thevenin. Dalam percobaan tugas akhir ini dilakukan dengan batas bila SVC belum aktif ($B_c=0.0\text{pu}$) dan selanjutnya kondisi minimum ($B_c=1.6\text{pu}$) dan kondisi bila B_c diset meningkat yaitu ($B_c=2.2, 2.8$, dan 3.4pu). Tabel 4.7 dibawah ini menunjukkan hasil batas dua bus transmisi dengan $\cos \Phi$ batas 0.8 dan 0.9 pada tabel 4.8.

Tabel 4.7 Hasil batas daya maksimum $\cos \Phi$ beban=0.8.

B_c (pu)	Bus	P_{\max} (MW)	V_{\max} (pu)	Pertambahan daya (MW)
0.0	9	14.348	0.524	0
	12	14.964	0.523	0
	16	11.413	0.516	0
	17	11.625	0.520	0
	18	12.334	0.521	0
1.6	9	14.381	0.525	33.16
	12	14.997	0.524	32.90
	16	11.445	0.518	31.83
	17	11.657	0.521	32.41
	18	12.367	0.523	32.59
2.2	9	14.394	0.526	45.64
	12	15.010	0.525	45.28
	16	11.457	0.519	43.81
	17	11.669	0.522	44.61
	18	12.379	0.523	44.86
2.8	9	14.406	0.526	58.13
	12	15.022	0.525	57.67
	16	11.469	0.520	55.82
	17	11.681	0.523	56.83
	18	12.391	0.524	57.14

Bc (pu)	Bus	Pmax (MW)	Vmax (pu)	Pertambahan daya (MW)
3.4	9	14.419	0.527	70.65
	12	15.034	0.526	70.09
	16	11.481	0.520	67.85
	17	11.694	0.524	69.08
	18	12.403	0.525	69.46

Tabel 4.8 Hasil batas daya maksimum, $\cos \Phi$ beban=0.9.

Bc (pu)	Bus	Pmax (MW)	Vmax (pu)	Pertambahan daya (MW)
0.0	9	17.726	0.558	0
	12	18.471	0.556	0
	16	14.057	0.549	0
	17	14.336	0.553	0
	18	15.213	0.554	0
1.6	9	17.767	0.559	40.36
	12	18.511	0.558	39.97
	16	14.096	0.551	38.49
	17	14.375	0.554	39.29
	18	15.253	0.556	39.53
2.2	9	17.782	0.559	55.54
	12	18.526	0.558	55.00
	16	14.110	0.551	52.98
	17	14.390	0.555	54.08
	18	15.268	0.556	54.40
2.8	9	17.797	0.560	70.75
	12	18.541	0.559	70.05
	16	14.125	0.552	67.50
	17	14.405	0.556	68.90
	18	15.282	0.557	69.31

Bc (pu)	Bus	Pmax (MW)	Vmax (pu)	Pertambahan daya (MW)
3.4	9	17.812	0.560	85.98
	12	18.556	0.559	85.13
	16	14.139	0.552	82.05
	17	14.420	0.556	83.75
	18	15.297	0.557	84.24

Penambahan Bc berbeda mampu memberikan batas Daya aktif maksimum yang berbeda. Penambahan terbesar terdapat pada bus 9 yaitu 39.53MW pada saat $\cos \Phi=0.9$.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:.

1. Sistem transmisi Jawa Bali 2024 dengan penambahan beban dan pengaktifan generator yang baru di pasang berdasarkan RUPTL 2016-2025 pada bus terjadi *undervoltage*.
2. Pemasangan SVC dan kapasitor bank mampu memperbaiki profil tegangan yang sebelum menjadi Sehingga tegangan pada tiap bus berada pada batasan yang ditentukan ($0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$).
3. Studi pengalihan daya terhadap masing-masing load bus menunjukkan rata-rata tegangan terendah terdapat pada bus 17, 16, 18, 12, dan 9, yaitu pada GITET : Cawang, Cawang Baru, Gandul , Bekasi, dan Duri-Kosambi.
4. Selain meningkatkan profil tegangan, SVC juga mampu meningkatkan batas maksimum loadbus.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan studi perhitungan batas kestabilan tegangan bila terjadi gangguan seperti kontingensi, pelepasan beban, dan pelepasan generator untuk mengantisipasi dampak-dampak terburuk bila terjadi gangguan dalam pengoperasian sistem interkoneksi Jawa Bali di tahun 2024.
2. Perlu dilakukan optimasi pemasangan beberapa tipe *FACTS Devices* dengan mempertimbangkan fungsi biaya (nilai ekonomis) dari peralatan tersebut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

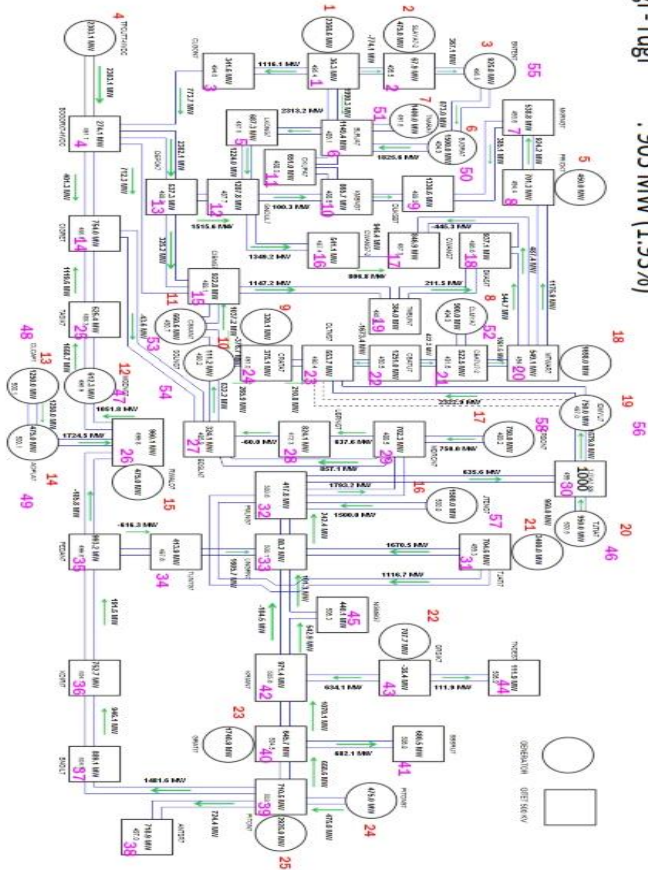
- [1]. Kundur, P, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [2]. Hadi Saadat, *Power System Stability Analysis*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994
- [3]. M.H, Haque, "Determination Of Steady State Voltage Stability Limit of a Power System in The Presence of SVC", IEEE, 2001.
- [4]. M.H, Haque, "Determination Of Steady State Voltage Stability Limit using PQ-Curve", IEEE, 2002.
- [5]. Niki Patel, "Study of Methods to Predict Voltage Collapse", NJIT, Team, May 2010.
- [6]. Mohammad M. Iftakhar, "Thevenin Equivalent Circuit Estimation and Application for Power System Monitoring and Protection", UK Knowledge Thesis, December 2008.
- [7]. Arief, Regorius, "Estimasi Batas Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik Dengan Memanfaatkan Variabel Lokal", Tugas Akhir ITS, 2006.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran 1 Single Line Diagram Sistem Interkoneksi Jawa, Madura, dan Bali 2024

Beban : 45,981 MW
 Pembangkit : 46,886 MW
 Rugi - rugi : 905 MW (1.93%)



Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran 2 Indeks kestabilan FVSI (Fast Voltage Stability Index) dan LQP (Line Stability Factor) setiap saluran.

Sisi kirim	Sisi terima	FVSI	LQP	Sisi kirim	Sisi terima	FVSI	LQP
2	1	0.0013	0.0013	53	15	0.0798	0.0855
1	3	0.0098	0.0099	16	17	0.0003	0.0003
1	6	0.0959	0.1046	18	17	0.0118	0.0119
55	2	0.0020	0.0020	20	17	0.0567	0.0585
3	4	0.1255	0.1322	19	18	0.0016	0.0016
4	13	0.0463	0.0490	20	18	0.0462	0.0470
14	4	0.0460	0.0503	21	20	0.0222	0.0227
4	15	0.0457	0.0486	22	21	0.0007	0.0007
6	5	0.0535	0.0560	52	21	0.0466	0.0479
5	12	0.0320	0.0328	23	22	0.0032	0.0032
6	11	0.0439	0.0458	24	23	0.0145	0.0156
50	6	0.0893	0.0992	56	23	0.2349	0.2792
51	6	0.0604	0.0631	54	24	0.0076	0.0079
8	7	0.0138	0.0138	47	25	0.0345	0.0463
7	9	0.0126	0.0126	26	35	0.2353	0.2342
20	8	0.0169	0.0171	26	47	0.0473	0.0600
10	9	0.0015	0.0015	49	26	0.0106	0.0115
11	10	0.0404	0.0420	28	27	0.0025	0.0025
12	10	0.0061	0.0061	29	27	0.3075	0.4588
13	12	0.0255	0.0263	27	54	0.0186	0.0199
12	16	0.0133	0.0135	29	28	0.3109	0.4590
13	15	0.0017	0.0017	32	29	0.0351	0.0691
25	14	0.0650	0.1218	58	29	0.0056	0.0059
14	27	0.0048	0.0048	32	30	0.0223	0.0414
15	19	0.0222	0.0229	46	30	0.0001	0.0001

Lampiran 2 Indeks kestabilan FVSI (Fast Voltage Stability Index) dan LQP (Line Stability Factor) setiap saluran (Lanjutan).

Sisi kirim	Sisi terima	FVSI	LQP
30	56	0.4969	0.5948
31	32	0.0114	0.0498
31	33	0.0021	0.0565
32	33	0.0844	0.0853
57	32	0.0006	0.0023
33	34	0.0173	0.0187
33	42	0.2093	0.2082
33	45	0.1659	0.1684
34	35	0.0141	0.0197
35	36	0.0822	0.0841
37	36	0.0233	0.0256
39	37	0.0799	0.1044
39	38	0.1848	0.2205
39	40	0.0429	0.0431
40	41	0.0653	0.0691
40	42	0.0339	0.0369
43	42	0.0065	0.0066
42	45	0.0062	0.0072
43	44	0.0019	0.0018
48	49	0.0046	0.0046
50	55	0.0150	0.0148
54	53	0.0042	0.0042

Lampiran 3 Analisa pemasangan SVC berdasarkan Tujuan atas Batas Kestabilan Tegangan dan Drop Tegangan pada tahun 2018-2024

Berdasarkan data RUPTL , Analisa pemasangan SVC dilakukan atas dasar studi batas kestabilan tegangan. setiap tahunnya dengan metode transfer daya maksimum. Setelah dilakukan studi maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Dalam kondisi proyeksi beban puncak setiap tahun 2018-2024 berada di bawah batas transfer daya maksimum, yang mengindikasikan bahwa sistem dengan beban puncak tersebut tidak mengalami tegangan jatuh (voltage collapse).
2. Analisis drop tegangan setiap tahun 2018 s.d 2023, menunjukkan bahwa pada tahun 2018 s.d 2023, tegangan berada di atas standar IEEE yaitu ditentukan ($0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$).
3. Analisis drop tegangan pada tahun 2024. Menunjukan adanya drop tegangan di bawah standar.
4. Pemasangan SVC pada tugas akhir ini lebih berguna untuk mengatasi drop tegangan dibandingkan batas kestabilan tegangan itu sendiri.
5. Analisa batas kestabilan tegangan pada bus yang telah dipasang SVC dapat dilihat pada bab 4.

Data studi batas kestabilan tegangan dan drop tegangan 2018-2024, yang menjadi rujukan atas hasil analisa diatas, dapat dilihat pada lampiran selanjutnya yaitu batas transfer daya maksimum pada (hal.67-68). dan drop tegangan pada (hal.73-74).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Yahri Redho Pranata, biasa dipanggil redho, merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Penulis lahir di Palembang, 30 September 1993. Penulis menempuh pendidikan tinggi sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mekatronika tingkat diploma di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung (Polman Bandung) dan berhasil meraih gelar A.Md pada September 2014.. Penulis akhirnya melanjutkan kembali pendidikan tinggi di bulan September 2015 sebagai mahasiswa Sarjana ekstensi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS Surabaya) di jurusan Elektro program studi Sistem Tenaga. email : yredho93@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BUS	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE
1	34.6	16342	34.9	15220	35.1	19884	28.1	20221	35.6	22170	36	23235	36.3	21307
2	70	16074	70.4	15330	70	19787	70	20116	69.3	22167	68.6	23232	67.9	21288
3	752.3	12489	543.1	12034	512	14582	66.3	14677	168	15679	371.3	16391	341.6	15053
4	(N/A)	(N/A)	222.6	13001	231.8	15321	243.2	17248	252.5	17257	263.1	17455	274.1	16758
5	412.6	8042	669	11463	778.8	13091	625.6	13254	705.4	13264	991.5	13922	687.3	13012
6	567.4	10627	997.5	18130	1072.8	20297	1111.3	20633	1048	21036	1071.3	22719	1149.4	21308
7	144.6	6336	168.2	15785	112.7	16442	193	16721	332.4	16432	450.4	16876	538.8	16380
8	(N/A)	(N/A)	629.9	17321	706.8	18061	947.3	18485	945.2	18105	1006.1	18443	701.3	17656
9	665.4	7946	567	16050	783.6	17131	1074.3	17635	1177.4	17506	1323.6	18108	1330.6	17406
10	779.6	8352	506.8	16175	403.9	17133	420.6	17446	721.5	17449	797.5	18053	865.7	17360
11	(N/A)	(N/A)	692.2	13291	513.5	16304	541.9	16556	766.3	16719	256	17207	651	16494
12	1007.3	9520	1138.9	14789	990	17631	1026.1	18306	1201.5	18279	1145	18658	1287.8	18079
13	413.3	9695	439.5	14549	469	16375	446.6	17467	492.7	17298	505.2	17562	537.3	16955
14	403.9	6717	328.3	7407	507.3	7737	578	7923	292.2	7968	668	8061	754	8185
15	504.5	9737	488.6	14475	534.8	15831	511.3	16737	795.1	16714	856.4	16948	922.8	16480
16	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	430.1	13863	451.3	14251	514.3	13962	531.6	14193	541.1	13698
17	684.1	7834	723.2	9500	650	14068	700.9	14467	761.2	14187	807.2	14423	846.9	13978
18	414.6	9900	355.2	12813	398.5	14693	269.4	15049	722.1	14968	773	15174	937.1	14884
19	471.2	9701	416.2	12539	462.4	14001	287.6	14344	787.7	14308	842.5	14495	384	13716
20	310.9	12522	297.4	19031	334.8	20391	396.9	20789	435.2	20255	476.2	20551	549.1	20166
21	85.9	9979	368.7	13103	334.3	13325	521.5	13489	531.3	13187	455.1	13079	522.5	13153
22	710.3	10117	827.4	13189	794.2	13386	808.3	13454	1072.8	13335	1137.9	13301	1251	13429
23	377.7	9874	435.9	12955	626.6	13274	572.5	13301	688.4	13077	734.1	13031	553.7	12995
24	249.7	10235	176.5	11966	150.1	12219	96.8	12291	275.4	12144	323.3	12065	375.1	12216
25	384.7	4446	325.8	4498	361.4	4496	409.3	4615	412.9	4899	466.3	5282	525.4	5731
26	610.2	8315	637.8	8619	775.1	8447	872.6	10090	925.7	10966	839.2	10638	960.1	12032
27	98.2	7269	127.1	9197	2.2	9423	42.4	9539	148.3	9522	225.8	9396	324.1	9669

BUS	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE	BEBAN	COLLAPSE
28	265.8	4137	317.8	4624	342.1	4729	420.3	4757	563.5	4766	761.4	4685	824.1	4794
29	350.2	3181	387	7947	458	7995	494.6	8010	335.4	8050	578.1	7950	702.3	8734
30	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	1000	7811
31	200.9	8670	572.3	11752	664.3	11611	749.3	11627	764.7	13317	610.7	13519	704.6	14989
32	272.2	3467	293.4	13048	435.4	12981	457.6	13004	361.3	13156	388.6	14275	417.8	15467
33	349.7	5495	105.6	8876	12.5	8715	12.2	8742	228.8	8958	234.1	9198	88.2	9780
34	(N/A)	(N/A)	425.3	7477	545.4	7382	435.1	7419	477.2	7560	378.7	7687	413.9	8218
35	724.8	3954	544.2	6099	555	6016	686.2	6102	1135.1	6305	901	6311	993.2	6779
36	701.7	3546	613	4054	761	4019	757.4	4067	755	4127	745.1	4160	752.7	4454
37	261.8	4557	354.6	4721	367.8	4665	395.8	4716	426.5	4741	454.8	4815	889.1	5222
38	(N/A)	(N/A)	483.1	1839	609	1832	632	1852	384.7	1885	563.4	1901	718.9	2051
39	994.5	16808	353.8	13273	431	13235	533.5	13376	638.5	12520	690.9	13016	710.5	13970
40	335	8480	334.1	7900	372.7	7856	339.9	7903	554.4	9825	586	11854	645.7	12425
41	(N/A)	(N/A)	488.4	3256	546.8	3242	463.3	3272	620.8	3632	642	3892	680.5	4108
42	805.3	6240	788.6	6367	890.6	6392	859.8	6449	871.7	6968	926.1	7373	971.4	7741
43	88.1	5530	21.1	5674	19.3	5625	10.8	5642	35.1	5936	38.6	6295	38.4	6462
44	351.5	4743	199.2	4846	163.2	4817	199.2	4851	253.4	5094	263.2	5335	111.9	5481
45	317.3	3507	454.9	3677	489.8	3661	488.7	3690	486	3816	422.2	3924	440.1	4139
	16172		18924		20706		21249		25170		26607		29019	

NO.	GENERATOR	BUS	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
			GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.
1	SURALAYA1	1	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370
2	SURALAYA2	1	350	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370
3	SURALAYA3	1	350	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370	(OUT)	370
4	SURALAYA4	1	350	370	248.5	370	300	370	200	370	200	370	200	370	350	370
5	SURALAYA5	1	570	600	(OUT)	600	(OUT)	600	(OUT)	600	(OUT)	600	(OUT)	600	(OUT)	600
6	SURALAYA6	1	530	600	(OUT)	600	328.1	600	376.7	600	338.2	600	344	600	337	600
7	SURALAYA7	1	570	600	(OUT)	600	400	600	310	600	400	600	400	600	550	600
8	NEWSLAYA1	2	513	600	310	600	310	600	310	600	560	600	500	600	500	600
9	BANTEN	55	560	625	320	625	320	625	320	625	570	625	450	625	450	625
10	JAWA9	55	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	560	600	450	600	450	600
11	JAWA7_1.1	50	(N/A)	(N/A)	500	1000	510	1000	510	1000	800	1000	700	1000	700	1000
12	JAWA7_2.1	50	(N/A)	(N/A)	500	1000	510	1000	510	1000	800	1000	700	1000	700	1000
13	JAWA5_1.1	51	(N/A)	(N/A)	250	500	260	500	260	500	260	500	470	500	470	500
14	JAWA5_1.2	51	(N/A)	(N/A)	250	500	260	500	260	500	260	500	470	500	470	500
15	JAWA5_2.1	51	(N/A)	(N/A)	250	500	260	500	260	500	260	500	470	500	470	500
16	JAWA5_2.2	51	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	470	500	470	500
17	PLTGU JAWA2	8	(N/A)	(N/A)	400	800	410	800	410	800	410	800	410	800	600	800
18	MTAWAR1.0	20	126	230.4	130	230.4	120	230.4	120	230.4	120	230.4	120	230.4	215	230.4
19	MTAWAR5.0	20	(OUT)	230.4	130	230.4	120	230.4	120	230.4	120	230.4	120	230.4	215	230.4
20	MTAWAR1.1	20	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148
21	MTAWAR1.2	20	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148
22	MTAWAR1.3	20	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148
23	MTAWAR2.1	20	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148
24	MTAWAR2.2	20	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148
25	MTAWAR3.1	20	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8
26	MTAWAR3.2	20	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8
27	MTAWAR3.3	20	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8

NO.	GENERATOR	BUS	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
			GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.
28	MTAWAR4.1	20	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8
29	MTAWAR4.2	20	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8
30	MTAWAR4.3	20	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8	(OUT)	148.8
31	MTAWAR5.1	20	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148	(OUT)	148
32	MTWR ADD-ON	20	500	650	330	650	350	650	320	650	610	650	610	650	615	650
33	PLTGU JAWA1.1	20	750	800	400	800	420	800	410	800	750	800	750	800	750	800
34	PLTGU JAWA1.2	20	750	800	400	800	420	800	410	800	750	800	750	800	750	800
35	PLTGU JAWA7.1	52	640	800	400	800	430	800	410	800	410	800	410	800	700	800
36	INDRAMAYU4.1	56	(N/A)	(N/A)	255	500	255	500	255	500	255	500	255	500	400	500
37	INDRAMAYU4.2	56	(N/A)	(N/A)	255	500	255	500	255	500	255	500	255	500	400	500
38	JAWA4_2.1	46	(N/A)	(N/A)	474	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
39	JAWA4_2.2	46	(N/A)	(N/A)	474	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
40	CIRATA1	24	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	100	112
41	CIRATA2	24	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	100	112
42	CIRATA3	24	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	100	112
43	CIRATA4	24	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	60	112	100	112
44	CIRATA5	24	60	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112
45	CIRATA6	24	60	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112
46	CIRATA7	24	91	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112
47	CIRATA8	24	106	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112	(OUT)	112
48	PLTA CISOKAN1	53	(N/A)	(N/A)	140	260	140	260	140	260	140	260	140	260	240	260
49	PLTA CISOKAN2	53	(N/A)	(N/A)	140	260	140	260	140	260	140	260	140	260	240	260
50	SAGULING1	54	98	164.88	91	164.88	91	164.88	91	164.88	91	164.88	91	164.88	120	164.88
51	SAGULING2	54	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88
52	SAGULING3	54	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88
53	SAGULING4	54	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88	(OUT)	164.88
54	PLTU JAWA1_1.1	58	(N/A)	(N/A)	470	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500

NO.	GENERATOR	BUS	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
			GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.
55	PLTU JAWA1_1.2	58	(N/A)	(N/A)	470	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
56	JATENG1	57	(N/A)	(N/A)	474	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
57	JATENG2	57	(N/A)	(N/A)	474	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
58	JATENG3	57	(N/A)	(N/A)	474	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
59	JATENG4	57	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	470	500	470	500
60	TJATIB 1.1	31	440	641.6	600	641.6	606	641.6	606	641.6	606	641.6	600	641.6	600	641.6
61	TJATIB 1.2	31	600	641.6	600	641.6	606	641.6	606	641.6	606	641.6	600	641.6	600	641.6
62	TJATIB 2.1	31	600	641.6	600	641.6	606	641.6	606	641.6	606	641.6	600	641.6	600	641.6
63	TJATIB 2.2	31	600	641.6	600	641.6	606	641.6	606	641.6	606	641.6	600	641.6	600	641.6
64	JAWA4_1.1	31	(N/A)	(N/A)	470	500	474	500	474	500	474	500	470	500	470	500
65	JAWA4_1.2	31	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	474	500	470	500	470	500
66	JAWA10	26	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	624	660	623	660	475	660	475	660
67	MATNGGNG1	47	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	200	225	200	225
68	MATNGGNG2	47	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	200	225	200	225
69	MATNGGNG3	47	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	200	225
70	CILACAP3 EXP	48	367	614	570	614	570	614	570	614	570	614	350	614	350	614
71	JAWA8_1.1	48	470	500	470	500	474	500	474	500	474	500	450	500	450	500
72	JAWA8_1.2	48	470	500	470	500	474	500	474	500	474	500	450	500	450	500
73	ADIPALA1	49	560	660	620	660	623	660	623	660	623	660	600	660	600	660
74	GRESIK2.1	43	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120
75	GRESIK2.2	43	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120
76	GRESIK2.3	43	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120
77	GRESIK3.3	43	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120
78	GRESIK12.0	43	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200
79	GRESIK3.0	43	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200
80	PLTGU JAWA3	43	684.4	800	758	800	758	800	758	800	758	800	700	800	700	800
81	GRATI1.1	40	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120

NO.	GENERATOR	BUS	2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
			GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.	GEN.	RAT.
82	GRATI1.2	40	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120
83	GRATI1.3	40	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120	(OUT)	120
84	GRATI1.0	40	180.2	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200	(OUT)	200
85	GRATI3 ADD-ON	40	(OUT)	150	(OUT)	150	(OUT)	150	(OUT)	150	(OUT)	150	(OUT)	150	(OUT)	150
86	GRATI4 PEAKER	40	420	450	427	450	427	450	427	450	427	450	250	450	250	450
87	PLTGU JAWA5.1	40	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	750	800	750	800	750	800
88	PLTGU JAWA5.2	40	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	750	800	750	800
89	PAITON1	39	228	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4
90	PAITON2	39	228	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4	(OUT)	378.4
91	PAITON3	39	571	806	450	806	765	806	520	806	(OUT)	806	(OUT)	806	(OUT)	806
92	PAITON5	39	400	640	607	640	606	640	605	640	600	640	600	640	600	640
93	PAITON6	39	600	640	607	640	606	640	605	640	600	640	600	640	600	640
94	PAITON7	39	600	640	607	640	606	640	605	640	600	640	600	640	600	640
95	PAITON8	39	600	640	607	640	606	640	605	640	600	640	600	640	600	640
96	PAITON9	39	600	640	607	640	606	640	605	640	600	640	600	640	600	640
97	KETAPANG1	4	(N/A)	(N/A)	400	800	410	800	410	800	600	800	600	800	700	800
98	KETAPANG2	4	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	410	800	410	800	600	800	600	800	700	800
99	KETAPANG3	4	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	410	800	600	800	600	800	700	800
TOTAL:			16433	23795	19319	34415	21006	35215	21579	36675	25488	38575	26990	40825	29137	41050

BUS	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	V _m	V _m	V _m	V _m	V _m	V _m	V _m
1	100.0	99.8	101.2	101.6	102.2	103.8	99.3
2	100.0	99.9	101.2	101.6	102.2	103.9	99.4
3	99.6	99.4	100.8	101.4	101.9	103.4	99.0
4	(N/A)	96.9	97.8	98.2	98.1	98.2	95.9
5	95.9	96.1	97.4	97.6	96.9	97.6	94.7
6	96.9	97.9	98.8	99.0	98.7	100.0	96.3
7	95.1	97.0	97.4	97.2	95.9	96.2	94.2
8	(N/A)	97.2	97.6	97.4	96.1	96.3	94.6
9	95.1	96.7	97.2	97.0	95.9	96.3	93.9
10	95.2	96.7	97.2	97.1	95.9	96.4	93.9
11	(N/A)	97.1	98.0	98.0	97.3	98.4	95.1
12	95.3	96.0	96.8	96.8	95.8	96.1	93.8
13	95.8	96.3	97.0	97.3	96.6	96.7	94.5
14	98.3	97.1	97.4	97.1	98.1	96.9	96.8
15	96.0	96.3	97.0	97.2	96.3	96.4	94.5
16	(N/A)	(N/A)	96.5	96.6	95.3	95.5	93.4
17	96.6	96.1	96.5	96.6	95.2	95.4	93.4
18	96.6	96.3	96.8	97.0	95.4	95.5	93.7
19	96.5	96.2	96.7	97.0	95.4	95.5	93.8
20	98.4	97.5	97.9	97.8	96.4	96.5	95.0
21	98.6	97.4	97.6	97.3	96.3	95.9	95.7
22	98.6	97.4	97.5	97.3	96.2	95.7	95.7
23	98.6	97.4	97.5	97.3	96.2	95.7	95.8
24	99.7	97.3	97.6	97.5	96.7	96.0	96.3
25	98.1	97.5	96.6	95.7	98.7	98.0	98.9
26	99.1	98.3	97.8	97.1	101.2	101.2	101.9
27	100.2	97.4	98.0	97.8	97.6	96.3	97.3

BUS	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	V _m	V _m	V _m	V _m	V _m	V _m	V _m
28	100.4	97.2	97.7	97.4	96.9	95.1	97.2
29	102.7	99.9	99.8	99.7	100.2	98.7	103.1
30	(N/A)	105.0	105.0	105.0	104.9	104.3	104.8
31	101.4	98.9	98.2	98.2	97.5	98.0	103.2
32	101.3	101.0	100.5	100.5	100.5	100.1	104.1
33	100.8	99.0	98.5	98.6	98.2	98.5	102.5
34	(N/A)	98.5	97.9	98.0	97.7	98.1	101.8
35	97.9	98.1	97.5	97.5	97.4	97.9	101.1
36	95.6	96.7	95.8	96.0	96.8	96.9	99.8
37	95.6	96.6	96.0	96.3	97.7	97.5	100.1
38	(N/A)	96.5	95.0	95.1	99.8	97.7	100.1
39	96.1	97.1	96.9	97.2	99.4	99.0	102.5
40	96.1	96.7	96.4	97.0	99.2	99.0	101.7
41	(N/A)	95.6	95.0	95.9	97.7	97.4	100.1
42	95.5	96.4	96.2	96.6	97.9	97.8	100.6
43	95.5	96.7	96.7	97.1	98.2	98.1	100.8
44	95.4	96.6	96.6	97.0	98.1	98.0	100.7
45	96.0	96.0	95.7	96.1	97.1	97.2	100.2

Halaman ini sengaja dikosongkan